

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Волгоградский государственный технический университет

*На правах рукописи*



**ФЕДОТОВ ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ  
ЦЕМЕНТИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ПУТЕМ ВЫБОРА  
РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ОБРАБОТКИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АБРАЗИВНОГО КРУГА**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Заслуженный работник Высшей школы РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Е.С. Киселев

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
<b>Глава 1. Особенности шлифования заготовок из цементируемых сталей и взаимосвязь основных показателей качества с эксплуатационными характеристиками.....</b>	<b>14</b>
1.1. Особенности шлифования заготовок из цементируемых сталей.....	14
1.2. Шероховатость, волнистость, макрогеометрия и износостойкость.....	24
1.3. Структурно-фазовый состав и микротвердость поверхностного слоя шлифованных деталей из цементируемых сталей.....	32
1.4. Обзор существующих моделей абразивного зерна и рабочей поверхности шлифовального круга.....	37
1.5. Методы определения количества абразивных зерен при моделировании шлифовальных кругов различной структуры.....	45
1.6. Основные методы компьютерного моделирования силовых характеристик процесса шлифования.....	60
1.7. Основные выводы.....	68
<b>Глава 2. Моделирование рабочей поверхности шлифовального круга.....</b>	<b>73</b>
2.1. Математическая модель режущей кромки абразивного зерна.....	73
2.2. Модель абразивного зерна.....	77
2.3. Моделирование структуры абразивного инструмента различными типами кристаллических решеток.....	82
2.4. Моделирование системы «зерно-связка» структуры шлифовального круга.....	91
2.5. Определение касательных напряжений сдвига, действующих на абразивное зерно в процессе шлифования.....	99
2.6. Определение силы резания, действующей на шлифовальный	

круг в процессе обработки .....	103
2.7. Определение максимального усилия удержания абразивного зерна в керамической связке.....	112
2.8. Выводы .....	117
<b>Глава 3. Экспериментальные исследования характеристик</b>	
<b>структуры шлифовального круга.....</b>	<b>118</b>
3.1. Определение геометрических и физико-механических параметров абразивного зерна .....	118
3.1.1. Материалы и образцы, используемые в эксперименте .....	119
3.1.2. Приборы и измерительная техника.....	123
3.1.3. Программное обеспечение.....	126
3.1.4. Методика определения геометрических параметров режущих кромок.....	128
3.1.5. Анализ полученных результатов.....	133
3.1.5.1. Анализ результатов эксперимента по значению коэффициента формы а.з. ( $K_f$ ).....	133
3.1.5.2. Анализ результатов эксперимента по значению размеров а.з.....	137
3.1.5.3. Анализ результатов эксперимента по определению значений минимальной глубины внедрения режущих и деформирующих а.з. в обрабатываемый материал.....	141
3.1.5.4. Анализ результатов исследований по определению значений коэффициентов $b_p$ , $v_p$ режущих и деформирующих а.з.....	145
3.1.5.5. Анализ результатов эксперимента по радиусу и углу при вершине а.з.....	148
3.1.5.6. Анализ результатов эксперимента по определению значения критерия $a_z/\rho$ .....	152
3.1.6. Основные выводы.....	154
3.2. Экспериментальное определение реальной штучной плотности абразивного материала .....	155

<b>Глава 4. Методика и основные результаты экспериментальных исследований процесса шлифования заготовок из цементируемых сталей.....</b>	<b>167</b>
4.1. Исследование изменений качественных характеристик поверхностного слоя в зависимости от элементов режима обработки и характеристик шлифовального круга .....	167
4.1.1. Актуальность и целеполагание исследования эксплуатационных и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей из цементируемых сталей.....	167
4.1.2. Методика экспериментальных исследований оценки остаточных напряжений, фазового состава, волнистости и микротвердости шлифованных цементированных заготовок с целью повышения качества их поверхностного слоя.....	168
4.1.2.1. Образцы для проведения исследований.....	168
4.1.2.2. Критерии оценки качества поверхностного слоя деталей .....	175
4.1.2.3. Параметры, контролируемые при исследованиях. Методы и средства измерения.....	177
4.1.2.4. Технические требования к шлифовальным кругам и инструменту правки .....	187
4.1.2.5. Смазочно-охлаждающие жидкости и техника их применения.....	189
4.1.2.6. Режимы шлифования.....	190
4.1.3. Математическое планирование экспериментов, состав и количество опытов.....	190
4.1.4. Обработка результатов исследований и их статистический анализ.....	191
4.1.5. Результаты измерений параметров качества поверхностного слоя заготовок.....	195
4.1.6. Исследование эксплуатационных и физико-механических свойств поверхностного слоя шеек шипов крестовины карданного вала. Основные результаты и выводы.....	200

4.2. Основные выводы.....	201
<b>Глава 5. Разработка технологических рекомендаций по применению результатов исследований и расчет ожидаемого экономического эффекта.....</b>	<b>202</b>
5.1. Анализ существующей технологии шлифования шеек шипов крестовины в условиях АО «Кардан» (г. Сызрань).....	202
5.2. Технологические рекомендации по проектированию операции шлифования заготовок из цементируемых сталей.....	203
5.3. Оценка экономического эффекта от применения результатов исследований на примере выполнения операции бесцентрового шлифования шеек шипов крестовины в производственный процесс АО «Кардан».....	204
5.3.1. Расчет капитальных затрат.....	204
5.3.2. Расчет текущих затрат на реализацию проекта.....	204
5.3.3 Оценка экономической эффективности технологических рекомендаций по применению результатов исследований в условиях АО «Кардан».....	211
Заключение .....	213
Список сокращений и условных обозначений .....	215
Список литературы .....	225
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	246
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	247

## Введение

### Актуальность темы исследования

Применение шлифования в качестве заключительной операции при изготовлении деталей из закаленных стальных цементированных заготовок является предпочтительным по сравнению с другими методами механической обработки. Общеизвестно, что такой метод обработки обеспечивает получение высокой износостойкости и точности шлифованных поверхностей при высокорентабельной производительности процесса и экономичности за счет замены закалки ТВЧ сплошной закалкой и сокращения затрат на выполнение аналогичных по назначению, иных процессов химико-термической обработки (азотирование, цианирование и др.).

Однако процесс шлифования закаленных цементированных сталей изучен недостаточно глубоко. Ряд исследователей отмечает, что износ абразивных кругов при шлифовании цементированных заготовок существенно больше по сравнению с обработкой одинаковых по твердости высокоуглеродистых стальных заготовок, а следовательно, обеспечивается меньшая производительность при съеме одинаковых припусков. По-видимому, это связано с отличиями структуры поверхностного слоя из-за наличия хрома, молибдена, никеля и других легирующих элементов, что увеличивает теплофизическую напряженность процесса шлифования. Особенно малоизученными являются аспекты влияния на производительность обработки разнородности физико-механических свойств сердцевины и поверхностного слоя заготовок, степень коробления и прижогаобразований при термообработке и шлифовании. Структура цементированных сталей изменяется по глубине поверхностного слоя иначе, чем для закаленных сталей ТВЧ. Распределение величины остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя у данных групп материалов также различно. Для цементированных сталей эксплуатационная характеристика износостойкости, как правило, выше, чем для закаленных токами ТВЧ высокоуглеродистых сталей. Ряд исследователей отмечает, что износ абразивных кругов при шлифовании цементированных заготовок существенно больше по сравнению с обработкой одинаковых по твердости высокоуглеродистых стальных

заготовок, что связано с отличиями в структуре поверхностного слоя, а следовательно, отличиями в теплосиловой напряженности работы инструмента.

Установлено, что при шлифовании заготовок из цементируемых сталей с высокой степенью концентрации углерода в пределах толщины поверхностного слоя наблюдается повышенная абразивная износостойкость, что затрудняет обрабатываемость шлифованием цементированные детали. Отмечается также «эффект самозакалки», который повышает абразивную износостойкость отшлифованных поверхностей. Характеристики кругов, используемые при шлифовании заготовок из закаленных углеродистых и из цементированных сталей, мало отличаются друг от друга и не учитывают повышенную абразивную износостойкость поверхностного слоя последних. Данный факт вынуждает обратиться к исследованиям связи между геометрическими параметрами, описывающими структуру круга, и силовыми факторами процесса шлифования заготовок из цементируемых сталей.

Форма абразивных зёрен (а.з.), используемых для изготовления шлифовальных инструментов, изменяется в широком диапазоне разновидностей. Это оказывает влияние на эксплуатационные характеристики кругов и эффективность процесса шлифования. Большинство исследователей описывают геометрию режущей кромки абразивного зерна с помощью параметров:  $\rho$  - радиус закругления режущей кромки и  $\varepsilon$  - угол при вершине режущей кромки. Однако они являются переменными по высоте режущей кромки, что не учитывается при выборе значений данных параметров при проектировании шлифовальной операции. Зависимости для оценки формы зерен, используемые разными авторами, содержат много коэффициентов, что усложняет и снижает достоверность инженерных расчетов и не учитывает особенности шлифования заготовок из цементируемых сталей. Литературный анализ показал, что существует необходимость создания единой математической модели, описывающей всю номенклатуру форм зерен шлифовальных кругов.

В большинстве работ авторы обоснованно утверждают, что количество а.з. на единице площади поверхности круга и закон их распределения оказывают влияние на силовые характеристики шлифования. При этом закон распределения зерен, по мнению исследователей, носит вероятностный характер. Существующие экс-

периментальные методы позволяют оценить количество зерен в структуре шлифовального круга с достаточно большой погрешностью.

В настоящее время исследователями широко используются численные методы цифрового моделирования шлифования в специальных программных пакетах типа ANSYS, Solidworks, LS-DYNA. Построение модели с использованием данных пакетов позволяет снизить экономические и временные затраты на реальное исследование процесса шлифования, заменяя натурный эксперимент виртуальной аналогией. Анализ работ зарубежных и отечественных авторов показал, что комплексный подход к проектированию шлифовальной операции невозможен без применения технологии цифрового моделирования. В основном, исследователи акцентируют внимание на изучении теплосиловых процессов в зоне контакта а.з. с обрабатываемым материалом без учета прочностных параметров структуры круга и особенностей обработки заготовок разной степени шлифуемости (например - заготовок из цементируемые сталей).

Заготовки деталей из цементированных сталей отличаются повышенными значениями усталостной прочности и износостойкости. Это не учитывается при выборе характеристик абразивных кругов для шлифования. В связи с этим возникает необходимость в дополнительных исследованиях по оценке влияния (остаточные напряжения, структурно-фазовый состав поверхностного слоя цементированной заготовки, а также изменения микротвердости обработанных поверхностей). Учитывая, что основная часть деталей различных машин и механизмов, работающих в условиях повышенного фрикционного взаимодействия, изготавливается из цементированных сталей, исследования по теме диссертации являются актуальными для различных отраслей промышленности.

В рамках данного диссертационного исследования предстоит, используя методы научно-технического познания, выявить особенности шлифования заготовок из цементируемых сталей и дать научно обоснованные рекомендации по увеличению производительности процесса обработки за счет применения высокоэффективных характеристик кругов и выбора рациональных режимов шлифовальных операций,

обеспечив при этом требуемое конструкторской документацией качество рабочих поверхностей детали.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам совершенствования технологии процессов шлифования заготовок из различных заготовок и назначения рациональных элементов режима обработки посвящены работы С.М. Братана, Д.И. Волкова, А.А. Глейзера, Д.Г. Евсеева, А.В. Королева, С.Н. Корчака, В.Ф. Макарова, Е.Н. Маслова, Ю.К. Новоселова, В.А. Носенко, А.Н. Сальникова, В.К. Старкова, Ю.С. Степанова, Л.В. Худобина, Takazawa K., Zhu В. и др. Огромный вклад в разработку новых абразивных инструментов внесли сотрудники ВНИИАШ и его филиалов. Различные аспекты характеристик абразивных кругов представлены в работах А.Г. Зайцева, З.И. Кремня, Н.В. Носова, В.М. Шумячера, П.И. Ящерицына, Jen T.C., Guo G., Malkina S. Однако вопросам выявления особенностей шлифования цементированных заготовок до последнего мнения уделялось недостаточное внимание.

**Научная новизна работы** включает решение актуальной научно-производственной задачи повышения эффективности процесса шлифования заготовок из цементированных сталей высокопористыми абразивными кругами, в частности:

- теоретически обосновано и экспериментально подтверждено введение новых инвариантных параметров геометрии единичного абразивного зерна – показателя формы единичной неровности и коэффициента наполненности профиля рабочей поверхности, определяющих распределение абразивных зерен в поверхностном слое шлифовального круга и микрогеометрию рабочей поверхности круга с целью повышения достоверности математического моделирования и прогнозирования теплосиловой напряженности процесса шлифования (специальность 2.5.5);
- на основе анализа теплосиловой напряженности процесса шлифования цементированной стали выявлена, теоретически обоснована, экспериментально подтверждена возможность изменения уровня технологических условий обработки (увеличение скорости резания и скорости врезной подачи с одновременным снижением времени выхаживания) с целью повышения производительности процесса при условии обеспечения качества обработки (специальность 2.5.6);

– теоретически обоснованы, экспериментально подтверждены и количественно описаны взаимосвязи распределения и формы абразивных зерен в структуре шлифовального круга и технологических параметров шлифования с состоянием поверхностного слоя шлифованной заготовки из цементированной стали, а именно с уменьшением объемного содержания остаточного аустенита, снижением остаточных напряжений и повышением микротвердости (специальность 2.5.6).

**Теоретическая значимость работы** состоит в определении зависимости между геометрическими характеристиками единичного абразивного зерна, рабочей поверхности абразивного инструмента и силовыми параметрами процесса шлифования высокопористыми кругами заготовок из цементированных закаленных сталей.

**Практическая значимость работы** заключается:

- в разработке технологических рекомендаций по шлифованию заготовок из цементированных сталей, позволяющие повысить производительность и качество изготавливаемых деталей за счет рекомендуемого по результатам исследований режима обработки заготовок из цементированных сталей высокопористыми шлифовальными кругами;
- в установлении рациональных режимов выполнения шлифовальных операций на основе учета оценки геометрических характеристик внутренней структуры высокопористых кругов;
- в разработке методики экспериментального определения геометрических параметров рабочей поверхности абразивных зерен и внутренней структуры шлифовального круга.

**Методы исследований.** Теоретические исследования базируются на теории шлифования, теории вероятностей и математической статистике. В ходе теоретико-экспериментальных исследований структуры абразивного инструмента применяли аналитическое и имитационное моделирование. Теоретико-экспериментальные исследования проводили в системах MathCAD и ANSYS. Для экспериментальной оценки топографии рабочих поверхностей шлифовальных кругов и микропрофилей поверхностей деталей применяли метод профилографирования. Проверка

адекватности разработанной математической модели структуры высокопористого шлифовального круга осуществлялась с использованием методов моделирования, основанных на аналитическом и численном эксперименте, а также на экспериментальной проверке результатов моделирования в лабораторных и производственных условиях.

**Экспериментальные исследования** проводились в лабораторных условиях филиала ФГБОУ ВО «СамГТУ» в г. Сызрани и ФГБОУ ВО «УлГТУ», а также в производственных условиях АО «Кардан» (г. Сызрань), с использованием современного оборудования и измерительной техники.

**Объектом исследования** является процесс шлифования цементированных заготовок с использованием рациональных характеристик абразивных кругов и режимов обработки, **предметом** – закономерности влияния параметров рабочей поверхности абразивных зерен круга, его структуры, режимов выполнения операции на производительность шлифования цементированных заготовок и качество обработанных поверхностей деталей машин.

**На защиту выносятся:**

1. Новая методика выбора эффективных режимов шлифования с учетом моделирования структуры абразивного круга (специальность 2.5.5).
2. Новые методы оценки рабочей поверхности абразивных зерен шлифовальных кругов для эффективной обработки заготовок из цементированных сталей (специальность 2.5.5).
3. Исследования эффективности процесса шлифования цементированных заготовок и качества поверхностного слоя обработанных деталей при использовании выбранных с учетом разработанных методов и методик оценки характеристик абразивных кругов и режимов шлифовальной операции (специальность 2.5.6).
4. Математическая модель рабочей поверхности и структуры шлифовального круга, описывающая распределение высот режущей кромки абразивного зерна (специальность 2.5.5).

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается использованием современной приборной и станочной базы, аттестованных методик исследований, достаточно обширным количеством экспериментальных данных, применением статистических методов обработки результатов исследований и их сопоставлением с работами других авторов.

**Реализация работы.** Результаты диссертационной работы использованы для усовершенствования технологического процесса обработки крестовины карданного вала в условиях АО «Кардан» (г. Сызрань) при выборе характеристик шлифовального круга и режимов шлифования, что позволило повысить производительность обработки на 17,5%, снизить себестоимость изготовления детали и обеспечить требуемое конструкторской документацией качество ее рабочих поверхностей.

Результаты работы апробированы и применяются в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» филиала ФГБОУ ВО «СамГТУ» в г. Сызрани при изучении дисциплин «Режущий инструмент», «Основы технологии машиностроения», «Технология машиностроения», а также курсового и дипломного проектирования.

**Апробация диссертационной работы.** Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях: VII Международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении» (г. Пенза, 2003 г.); IV Международной конференции молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы современной науки» (г. Самара, 2003 г.); Всероссийских научно-технических конференциях-семинарах «Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы» (г. Сызрань, 2006-2010 г.г., 2012, 2013 и 2015 гг.); Международной научно-технической конференции «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы» (г. Волжский, 2006 г.); V Международной научно-технической конференции «Материалы и технологии XXI века» (г. Пенза, 2007 г.); IV Международной научно-практической конференции

«Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» (г. Брянск, 2012 г.); XII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Новосибирск, НГТУ, 2021 г.); VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении» («ИТММ-2022») (г. Пермь, 2022 г.); XXX Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2023 г.); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы станкостроения» (г. Пенза, 2025 г.).

Диссертационная работа в полном объеме заслушивалась и была одобрена на заседании кафедр «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и «Инновационные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет».

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 28 работ, в том числе: 5 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ; 2 публикации в журналах, индексируемых в базе цитирования Scopus; 21 работа в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, содержащего 181 наименование, 2-х приложений. Общий объем работы – 248 страниц. Работа содержит 90 рисунков и 30 таблиц.

# **1. Особенности шлифования заготовок из цементируемых сталей и взаимосвязь основных показателей качества с эксплуатационными характеристиками**

## **1.1. Особенности шлифования заготовок из цементируемых сталей**

Процесс эксплуатации механизмов и машин сопровождается, как правило, поверхностным износом подвижных элементов, что существенно сказывается на качестве поверхностного слоя и эксплуатационных характеристиках работающих деталей. Параметры прочностного ресурса деталей и их уровень сопротивления усталостному износу, определяемые точностью изготовления, шероховатостью и волнистостью поверхности, микротвёрдостью поверхностного слоя и физико-механическими характеристиками, оказывают влияние на показатели надёжности и долговечности механизмов и машин в целом.

Среди перечисленных параметров наиболее часто уделяют внимание шероховатости поверхности, которая влияет не только на условия контакта находящихся в сопряжении элементов механизмов, но и определяет на микроуровне напряжённое состояние в поверхностном слое. Формируемое грубой шероховатостью несовершенства микропрофиля поверхности деталей машин могут стать зоной очага образования и последующего развития различного рода эксплуатационных дефектов, в том числе усталостных трещин. Поэтому надёжность и долговечность рабочих поверхностей деталей следует оценивать из улучшения их качественных характеристик за счёт однократного или многократного применения последовательных технологических методов механической обработки заготовок.

Окончательное качество поверхности достигается на финишных этапах механической обработки заготовок. В этом отношении шлифование является одним из самых востребованных методов финишной обработки стальных деталей механизмов и машин, позволяющих оказывать влияние на параметры усталостной прочности, микротвёрдости, износостойкости и т.д. [1–9, 158-164]. В тех случаях, когда достичь должного уровня отмеченных параметров только благодаря базовым физико-механическим свойствам применяемых материалов невозможно,

применяют различные методы их упрочнения. Например, при изготовлении высоконагруженных ответственных деталей (валы, зубчатые колёса, шестерни, крестовины карданов, поршневые кольца и т.д.) применяют химико-термическую обработку (ХТО), чаще всего цементацию, нитроцементацию, с целью повышения усталостного износа посредством науглероживания поверхностного слоя, после чего заготовки подвергают закалке с последующей корректировкой размеров шлифованием [1–9, 154-160].

В настоящее время наблюдается активное применение и развитие методов науглероживания стальных деталей и заготовок. Тенденция к модернизации уже имеющихся и разработке новых методов такого рода упрочнения обусловлена постоянно меняющимися требованиями, предъявляемыми к ответственным деталям, ввиду чего одним из наиболее рациональных способов является улучшение физико-механических свойств с помощью процедуры цементирования, термообработки и последующего шлифования.

Современные применяемые методы цементации сталей при низком давлении (LCP) по отношению к традиционной цементации (метод которой известен более 200 лет [9]) имеют отличительные преимущества, заключающиеся в отсутствии внутреннего окисления, минимального коробления детали или заготовки, наилучшей однородности и качестве получаемых науглероживанием упрочнённых слоёв [155, 158-160]. Среди публикаций, посвящённых вопросам оценки качества цементированного упрочнённого слоя после шлифования, наиболее часто рассматривается вакуумный метод цементации стали [5, 155, 158, 160], в том числе модернизированный на его основе метод поточного науглероживания под низким давлением [1548, 159]. В работе [5] в качестве предпочтительных и наиболее эффективных методов упрочнения указаны ионные методы цементации и нитроцементации, которые позволяют с высокой точностью управлять процессом насыщения стали углеродом.

Сочетание вакуумной цементации с инновационной кинематикой процесса абразивной обработки представлено в работе [155]. Её отличительная особенность, отмеченная в статье, заключается в непараллельности цилиндрической оси

вращения образца и оси вращения шлифовального круга относительно плоскости шлифовального стола. Эффективность метода подтверждается повышением прочности на изгиб обработанных деталей на 30% по сравнению с обычным продольным шлифованием.

Ряд работ [158, 159] отражает эффективность непрерывной подачи масляного тумана в зону контакта шлифовального круга с обрабатываемой цементированной поверхностью методом минимального количества смазки (MQL) на этапах финишной обработки с целью снижения неблагоприятного термического воздействия. Однако обобщить полученные данные на все возможные случаи, основываясь только на результатах представленных работ, невозможно. Согласно данным работы [156], при попадании смазки в область трещиноподобного микродефекта происходит её расширение и последующее увеличение в радиальном направлении.

Среди современных инновационных технологий необходимо отметить метод микронауглероживания шлифуемых поверхностей изделий из стали без применения ХТО и термообработки [161, 162]. В отличие от традиционной термообработки, науглероживание происходит одновременно с процессом шлифования, что приводит к более продуктивному использованию выделяемой энергии и эффективности насыщения обрабатываемой поверхности углеродом при одновременном увеличении механических свойств материала и качества поверхностного слоя.

Следует отметить, что для реализации любого из вышеуказанных методов необходимо иметь качественное оборудование, оснащённое высокопроизводительными компьютеризированными системами и современными средствами автоматизации.

Несмотря на очевидную эффективность применения цементации и шлифования стальных изделий, существует также ряд особенностей их выполнения на этапе заключительной обработки заготовок.

При шлифовании цементируемых сталей с высокой степенью концентрации углерода в сочетании с легирующими присадками хрома, никеля, молибдена и др.

в пределах толщины цементируемого слоя наблюдается повышенная абразивная стойкость шлифуемой поверхности заготовки. Само понятие «абразивная износостойкость» широко используется в терминологии многими исследователями в области шлифования [5-7, 10] и объясняется как процесс сопротивления отделению микрочастиц материала от изнашиваемой абразивными зернами шлифовального круга поверхности заготовки под действием нормальной силы резания с частичным преобразованием наружного слоя в стружку. Как отмечают авторы работы [10], механизм износостойкости шлифуемого материала представляет собой сложный процесс, который определяется не только силовыми факторами, но и характеристиками его структуры и усталостными свойствами. Поэтому процесс обработки шлифованием цементированных заготовок в сравнении с обработкой нецементированных сталей гораздо чаще приводит к образованию поверхностных шлифовочных дефектов вследствие углеродного охрупчивания. В подтверждение этому можно отметить публикацию [5], где авторы на примере исследования процесса обработки образцов из цементируемой стали 16ХЗНВФМБ-Ш отмечают, что получение низкого уровня концентрации углерода в поверхностном слое при многостадийной газовой цементации облегчает процесс шлифования и снижает риск возникновения прижогов, а оптимальная доля карбидной фазы в диффузионном слое в пределах 15% уменьшает вероятность появления эффекта микротечучести и усталостного трещинообразования. Однако меньшее содержание углерода в цементированном слое соответствует сниженным характеристикам качества поверхности и долговечности.

В работах Малинова Л. С. с соавторами [6, 7] при исследовании структуры цементируемых сталей отмечается «эффект самозакалки» в процессе шлифования, связанный с превращением большей части метастабильного аустенита в мартенсит при деформационном воздействии абразивных частиц, что в результате повышает абразивную износостойкость шлифованных поверхностей.

При этом из сравнительного анализа результатов шлифования цементированных и нецементированных сталей марок 40Х, 65Г и У8 в работе [6] следует, что их абразивная износостойкость повышается с увеличением процентного со-

держания углерода. При этом, после одной и той же термообработки сопротивляемость абразивному износу цементированных сталей повышается до 1,5 раз по сравнению с нецементированными закаленными до той же твердости. В отличие от результатов работы [10], исследователи не отмечают, что повышение износостойкости сталей цементацией сопровождается увеличением хрупкости упрочненных слоев, вследствие чего снижается ударная вязкость и сопротивляемость разрушению от трещинообразования.

В процессе воздействия высокой температуры с поочередным охлаждением происходит самозакаливанию. Превращение аустенита в мартенсит сопровождается объемными изменениями кристаллической решетки, что оказывает влияние на показатели качества шлифованной поверхности, в частности на остаточные напряжения и микротвердость. Мартенситный поверхностный слой трудно обрабатывать механически.

Исследования Малинова Л. С. демонстрируют, что в процессе шлифования цементированных сталей в зоне формообразования новой поверхности абразивными зернами контактная (мгновенная) температура достигает 1500 °С. При этом отмечается [6], что после закалки стали от 900 °С содержащийся в поверхностном слое метастабильный остаточный аустенит при воздействии абразивных частиц имеет благоприятную способность превращаться в мартенсит деформации.

Важно заметить, что описанный Малиновым Л. С. механизм структурного изменения отличается от общепринятого представления, открытого Садовским В.Д. [11, 12] эффекта о превращении мартенсита в остаточный аустенит при быстром нагреве частиц последнего до высоких температур только от одного термического воздействия, сопровождающегося «фазовым наклепом». При этом он в работе [11] напоминает о существовании критической скорости охлаждения, влияющей на бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит.

При изучении влияния мгновенного высокотемпературного нагрева шлифуемых стальных деталей на образующиеся в них поверхностные шлифовочные дефекты Масловым Е. Н. [13] был также установлен ряд особенностей, связанных с фазовыми превращениями и структурными изменениями металла в приповерх-

ностном слое. С позиции предложенной собственной теории шлифования данный факт Маслов Е. Н. обосновывает образованием максимальной температуры в зоне шлифования, приближенной к температуре плавления обрабатываемого материала. В частности отмечается, что подверженная процедуре закалки сталь при ее дальнейшей интенсивной абразивной обработке «испытывает вторичную закалку на аустенит». При этом процентное содержание аустенита в поверхностном слое после закалки и последующей абразивной обработки существенно выше, чем после обычной закалки. Формирование в структуре стали аустенитного или мартенситного слоя, образующегося ввиду мгновенного нагрева при шлифовании (выше 800–850 °С) и последующего быстрого охлаждения (до температуры, близкой к 20 °С), при условии отсутствия прижогов на обрабатываемой поверхности будет зависеть от скорости охлаждения.

Особенность наличия аустенитно-мартенситного слоя в стальных изделиях имеет отражение и в научной работе [163] зарубежных учёных, исследовавших микроструктуру превращений закаленного металла. Авторами описан процесс циклического превращения между мартенситом и аустенитом как «термическое циклирование» («thermal cycling»), примененное впервые Гранжем Р. А. на примере термообработанной среднеуглеродистой стали AISI8640. В отношении к низкоуглеродистым закаленным сталям авторы отмечают, что чем выше скорость нагрева при температуре 850 °С и короче время аустенизации (образования аустенитной структуры в материале), тем наблюдается меньший размер зерен аустенитной матрицы (менее 5 мкм), формирующей мартенситную структуру материала. Отмечается также, что накопленная в процессе превращения аустенита в мартенсит упругая энергия деформации и самоадаптация в значительной степени оказывают влияние на образование различных вариантов мартенситной структуры.

Авторы работ [156, 157] объясняют появление прижогов и трещин в большинстве цементируемых сталей необратимыми изменениями микроструктур поверхностного слоя, образующихся под воздействием высоких температур и быстрого охлаждения при неоптимизированном процессе шлифования.

Важно отметить, что схожие выводы следуют и из работы [14], в которой затрагивается проблема появления прижогов при плоском шлифовании закалённых деталей из стали 40Х абразивными кругами различной пористости. Согласно приведённым результатам, установлено, что на интенсивность образования прижогов при плоском шлифовании, главным образом, влияет тепловое разупрочнение поверхностного слоя деталей.

Преобладающее количество научных работ отечественных и зарубежных исследователей посвящено изучению микротвёрдости, шероховатости поверхности и характера технологических остаточных напряжений (ТОН) по толщине упрочнённого слоя цементируемых сталей, обработанных шлифованием. В этом ключе следует выделить результаты работ [154, 155, 158, 159] по определению влияния характеристики абразивных кругов и режимов шлифования заготовок из цементируемых сталей различных марок на величину и характер распределения микротвёрдости и уровень ТОН в поверхностном слое (ПС) шлифуемых образцов. Установлено, что наилучшие параметры микротвёрдости и уровня остаточных сжимающих напряжений, предварительно наведённых цементацией, достигаются при использовании шлифовальных кругов с повышенной пористостью и подачей смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) методом MQL.

В. К. Старков в своей монографии [8] отмечает, что при шлифовании винтовых пар из цементированной стали 18Х2Н4ВА электрокорундовыми кругами со структурой 8...10, F60 (25) и твёрдостью K(SM1)...L (SM2) в пределах глубины упрочнённого слоя 20...60 мкм формируются технологические остаточные напряжения (ТОН) сжатия величиной до 30 МПа. При этом, в сочетании с получаемой шероховатостью поверхности  $Ra = 0,4...0,63$  мкм и высокой трудоемкостью обработки, эффективность финишной обработки подтверждается достаточным уровнем надёжности и износостойкости.

Сохранение уровня сжимающих ТОН или незначительное их снижение (по модулю) при применении последующих после цементации операций механической или термической обработки является главной задачей большинства методов упрочнения. Это следует из тех соображений, что на этапах финишной обработки

(например шлифованием) удаление даже малого припуска с сжимающими ТОН может серьёзно сказаться на параметрах усталостной прочности эксплуатируемой в дальнейшем детали. Основанный на этом факте, в статье [3] авторами предложен метод применения операции шлифования цементируемой стали 20Х2Н4А до цементации и полирования после. Приведённые результаты исследования свидетельствуют о существенном уменьшении шероховатости поверхности ( $Ra = 0,43$  мкм), повышении предела выносливости таких деталей на 41% и благоприятном уровне остаточных сжимающих напряжений вследствие отсутствия негативного влияния шлифовочных растягивающих ТОН.

Особое внимание следует уделить работе Р. Ш. Блурцяна с соавторами [2], где рассматривается бесцентровое шлифование грузовых автомобильных крестовин карданных валов из цементированных сталей 18ХГТ. Согласно представленному подходу, процесс абразивной обработки выполнялся за две операции шлифования с использованием СОЖ в виде водной эмульсии с добавлением кальцинированной соды. Показано, что шлифовочные растягивающие ТОН за время выхаживания  $T_b = 3 \dots 20$  с достигают своего минимума при  $T_b = 12$  с, а при  $T_b = 3$  с и  $T_b = 20$  с принимают максимальные значения. Важно заметить, что аналогичное и независимое от представленной работы исследование по оценке уровня шлифовочных ТОН рассматривалось в качестве одной из задач, решаемых в рамках настоящей диссертационной работы [1]. В отличие от упомянутой работы [2], исследование поверхностного слоя проводилось для упрочнённых цементированием крестовин карданных валов легковых автомобилей, изготовленных из стали 19ХГН, с последующим бесцентровым шлифованием абразивными кругами 92А F150 О 8 V5 с номерами структур 8, 12 и 16. Бесцентровое шлифование сопровождалось подачей универсальной биостабильной 2-3% полусинтетической СОЖ «Coolant». При этом установлено, что минимальный уровень растягивающих ТОН  $T3 = 109,7$  МПа формируется при скорости врезной подачи  $V_S = 1,5$  мм/мин, времени выхаживания  $\tau = 1$  с и шлифовании кругом 8 структуры, а максимальные значения ТОН  $T3 = 169$  МПа и  $T3 = 180,7$  МПа – при  $V_S = 2,5$  мм/мин,  $\tau = 5$  с и шлифовании кругами 8 и 16 структуры соответственно.

Наиболее эффективный метод финишной абразивной обработки стальных деталей и заготовок, поверхностный слой которых был предварительно подвержен цементации, заключается в применении высокопористых шлифовальных кругов. Полученные результаты демонстрируют высокое качество обработанных поверхностей без образования на них прижогов, микротрещин и иных дефектов шлифовочного характера, возникновение которых главным образом связано с влиянием повышенных температур в зоне контакта абразива с обрабатываемой заготовкой [8, 15, 16, 164-166].

Среди зарубежной научной литературы по целесообразности применения высокопористых кругов при шлифовании труднообрабатываемых материалов можно отметить труды Dubovska R. с соавторами [164, 165] по исследованию процесса шлифования цементированных заготовок из подшипниковой стали марки 14109.4. Исследователи считают, что образованию бездефектного состояния поверхностного слоя после шлифования высокопористыми электрокорундовыми шлифовальными кругами на керамической связке A99K809V и A99K8013V способствует снижению осевых и касательных составляющих силы резания. Этот факт объясняется меньшим количеством активных зерен, участвующих в зоне шлифования, в результате чего процесс резания сопровождается лучшим отводом тепла от зоны резания из-за более высокой пористости абразивного инструмента, чем в случае применения кругов с меньшей степенью пористости.

Меньший нагрев при шлифовании в результате использования инструмента с высокопористой структурой отмечается и в статье [166]. Авторы приводят результаты шлифования науглероженных методом вакуумной цементации под низким давлением стальных образцов из сплава 20MnCr5 двумя абразивными кругами – Quantum 2NQ60JVS3, состоящим на 20% из абразивных зерен Norton Quantum и на 80% из алундовых зерен, и высокопористым кругом Vortex IPA60EH20VTX, изготовленным из алокситовых абразивных зерен. Установлено, что процесс шлифования высокопористым кругом Vortex позволяет в большей степени сохранить сформированные цементацией остаточные сжимающие напряжения непосредственно под обработанной поверхностью из-за снижения тепло-

выделения при трении в активной зоне за счет наличия большего количества смазки в межзеренном пространстве, что также повышает износостойкость инструмента.

В научных работах отечественных учёных [8, 15, 16] отсутствие шлифовочных дефектов при использовании высокопористых кругов отмечается для случая выполнения операции шлифования упрочнённых цементацией заготовок зубчатых колес. Следует отметить, что такая механическая обработка осуществляется в условиях нестационарного термодинамического нагружения. Снижение контактных нагрузок при таком методе абразивной обработки позволяет уменьшить теплонапряжённость в зоне резания, в связи с чем, появляется возможность существенного увеличения элементов режима резания и уменьшения износа инструмента. При этом, как отмечают авторы работы [15], применять абразивные инструменты с повышенной пористостью рекомендуется на стадии чистового зубошлифования заготовок после ХТО и закалки до твердости 62...64 HRC.

Несмотря на высокий уровень изученности широкого спектра вопросов, связанных с высоким качеством обработки поверхности высокопористыми кругами, область исследования в отношении оптимизации процессов шлифования упрочнённых таким методом заготовок в производстве до конца не изучена. Так, например, в случае инновационной технологии сухого шлифования торцевых поверхностей заготовок зубчатых шестерен автомобилей, перспективность такого метода представлена в работе [167]. Экспериментами показано, что высокая пористость структуры абразивных кругов демонстрирует худшие показатели качества обработанных поверхностей (с точки зрения возникновения шлифовочных прижогов) по сравнению с менее пористыми шлифовальными кругами.

Основываясь на вышеизложенном материале, можно сделать вывод, что получение качественной микроструктуры упрочнённого слоя цементируемых стальных деталей в сочетании с требуемыми механическими характеристиками на практике является очень сложной и трудоёмкой задачей. Среди всех существующих методов финишной обработки определённой группы цементированных сталей невозможно выделить универсальный ввиду влияния обширного количества

всевозможных факторов на выходные параметры (шероховатость, микротвёрдость, уровень ТОН, толщина упрочнённого слоя и т.д.).

Установлено, что при шлифовании заготовок из цементируемых сталей с высокой степенью концентрации углерода в пределах толщины цементируемого слоя:

- наблюдается повышенная абразивная износостойкость заготовок, что затрудняет обрабатываемость шлифованием и приводит к образованию дефектов;

-отмечается «эффект самозакалки», связанный с превращением большей части метастабильного аустенита в мартенсит поверхностного слоя при деформационном воздействии абразивных частиц, что в результате повышает износостойкость отшлифованных поверхностей.

В этой связи настоящее диссертационное исследование посвящено разработке метода моделирования структуры круга, которое позволит прогнозировать режимные и силовые характеристики процесса шлифования и оценивать при проектировании технологического процесса обработки заготовок деталей из цементированных сталей эксплуатационные свойства и качественные характеристики ее шлифованных поверхностей.

На следующем этапе анализа литературных источников выявлена необходимость в изучении математических зависимостей, используемых авторами для количественной оценки показателей шероховатости, волнистости, микротвердости и износостойкости обработанных шлифованием деталей.

## **1.2. Шероховатость, волнистость, макрогеометрия и износостойкость**

Важнейшими качественными и эксплуатационными характеристиками шлифованных поверхностей являются параметры шероховатости, волнистости, макрогеометрии и износостойкости. В первую очередь они определяют эффективность и долговечность того или иного узла, составляющими частями которого являются детали, изготавливаемые на шлифовальных операциях. В связи с этим в ходе исследования необходимо оценить методики моделирования данных характери-

стик на современном этапе развития научного познания и определить возможность их применения для совершенствования процессов проектирования и шлифования цементированных заготовок.

По мнению ряда исследователей [17-21], основная роль в процессе формирования микрогеометрии шлифованных поверхностей принадлежит кинематическому переносу геометрических характеристик рельефа рабочей поверхности круга на поверхность заготовки. На наш взгляд, наиболее полный анализ формирования микрорельефа шлифованной поверхности выполнен в рамках кинематической модели с позиций теории вероятности и случайных функций в работах [17, 18, 22, 23]. Количество а.з. на единице площади наружной поверхности шлифовального круга (ШК), зернистость, концентрация составляющих ШК и другие факторы, играющие особую роль при шлифовании кругами различной структуры заготовок из цементируемых сталей, учтены в математических моделях, представленных в табл. 1.2.1.

Влияние факторов, характеризующих структуру ШК, на микрорельеф достаточно полно выявлено В.М. Исаковым, В.И. Курдюковым, В.И. Островским [19, 24, 25] и другими исследователями.

В.М. Исаковым [24] получена эмпирическая модель (1.2.1), представленная в таблице 1.2.1., с ограничениями на режим резания по шероховатости поверхности. Эта модель содержит коэффициент, учитывающий соотношение между  $d_0$  – диаметром окружности, описанной вокруг зерна и проходящей через наиболее его выступающую и размером площадки затупления на зерне  $l_{\phi 1}$ . Коэффициент  $K_0$  (зависимость 1.2.2., табл. 1.2.1.) содержит параметры концентрации зерна  $K_z$ , связки  $K_c$  и пор  $K_{пор}$  в круге, характеризующие структуру ШК.

В работе [25] получена эмпирическая модель (1.2.6), которую дополнили составляющей образования навалов  $h_n$  из зависимости Л.Н. Филимонова [20]. В результате была получена окончательная зависимость (1.2.5), также представленная в таблице 1.2.1. В публикации [19] приведена эмпирическая модель (1.2.7), описывающая влияние элементов режима резания и характеристик круга на параметр  $R_a$  шероховатости поверхности.

Таблица 1.2.1 – Зависимости для определения параметров микрогеометрии поверхностей шлифованных заготовок

Зависимость	№ зависи- мости по настоящей работе	Автор источника
$Ra = \frac{1,4v_{S_{\text{прод}}} \cdot S_x \cdot t_{\phi}}{K_3 \cdot (K_0 \cdot d_0) \cdot v \cdot Fi}$ <p>где <math>K_0 = K_3 \cdot K_c \cdot K_i / K_{\text{пор}} \cdot d_0</math></p>	1.2.1 1.2.2	Исаков В.М. [24]
$Ra = H_{\text{yc}} \cdot M_1$ $H_{\text{yc}} = M_2 \left[ \frac{t_{\text{ш}} \cdot H_o^k}{2\sqrt{\rho_a - h_o} (V_k / V_3 \pm 1) \cdot Z_o \sqrt{D_3}} \right]^{\frac{1}{k+2}} + N_1 \cdot h_o$	1.2.3 1.2.4	Королев А.В. [17, 22, 23]
$Ra = Ra_{\text{кин}} + h_n \cdot (\varepsilon_{\text{но}} - C_n \cdot V_k),$ <p>где <math>Ra_{\text{кин}} = 34,6 \cdot d_0^{0,83} \cdot K_3^{-0,275} \cdot V_3^{-0,325} \cdot D_3^{-0,17} \cdot \varepsilon^{B/S_x-1}</math></p>	1.2.5 1.2.6	Курдюков В.И. [25]
$Ra = 2,8 \left( \frac{V_3}{V_k} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{t}{D_3} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{S_x}{B_k} \right)^{0,5} \cdot K_{\delta}^{0,5} \cdot d_0^{0,5},$ <p>где <math>K_{\delta} = \frac{1 - K_c - K_3}{K_3 \cdot (19,5(K_3 + K_c) \cdot 2,5)} \cdot K_3'</math></p>	1.2.7 1.2.8	Островский В.Н. [19]

В статье [17] представлена зависимость (1.2.3), которая содержит переменную  $H_{\text{yc}}$ , определяемую по (1.2.4). Из этой зависимости видно, что на шероховатость поверхности заготовки из характеристик круга оказывает влияние число абразивных зерен (а.з.) на единице рабочей площади ШК

В работе [8] автор рассмотрел влияние параметров, характеризующих структуру ШК, на параметр шероховатости  $Ra$  поверхности при чистовой обработке.

Пирозерская О. Л. [26] утверждает, что влияние режимов резания на величину параметров шероховатости поверхности шлифуемых деталей такое же, как и при других видах абразивной обработки. Увеличение подачи заготовки и глубины

резания приводит к увеличению высотных параметров шероховатости поверхности, а увеличение рабочей скорости круга ведет к снижению ее величины [26].

Анализ результатов исследований, приведенных в работе [27] по формированию высоты профиля шероховатости при различных методах обработки шлифованием, позволяет сделать вывод, что на образование большинства параметров шероховатости обработанной поверхности при всех методах шлифования оказывают влияние следующие факторы: геометрия и шероховатость рабочей части абразивного зерна круга, кинематика его рабочего движения; колебательные перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности; упругие и пластические деформации обрабатываемого материала в зоне контакта с рабочим инструментом.

Широковым А.В. [28] разработана имитационная модель процесса формирования шероховатости обработанной поверхности при различных видах шлифования с учётом характеристики круга, режимов его правки, колебаний и режимов шлифования. Данная модель формирования микропрофиля единичной абразивной царапины, базируется на объёмной модели зерна в виде параболоида вращения. Предложены зависимости определения высоты абразивной царапины от геометрических параметров рабочей части зерна с учётом его износа, режима шлифования и пластических свойств обрабатываемого материала.

В работе [29] апробирован на практике метод параллельных сечений и разработано специальное приспособление для получения топографии рабочих поверхностей шлифовальных кругов. Получены статистические характеристики рабочих поверхностей различных шлифовальных кругов.

Лурье Г.Б. [30] считает, что с увеличением скорости круга возрастает количество зерен, участвующих в процессе шлифования. Это приводит к уменьшению глубины врезания отдельных зерен и способствует уменьшению высоты микронеровностей. При экспериментах [31] автором получена зависимость между средним арифметическим отклонением  $Ra$  и рабочей скоростью круга:

$$Ra = C \cdot v_k^\alpha \quad (1.2.9)$$

Значения для показателя степени  $\alpha$  колеблются в пределах 0,7-0,8.

Исследования [32] показали наличие зависимости:

$$Ra = C \cdot d_3^\alpha \quad (1.2.10)$$

где значения показателей степени  $\alpha$  колеблются в пределах 0,5—0,7.

Согласно результатов исследований Абакова Л.В. и Васильева Н.Н. [33, 34], с повышением твердости круга уменьшаются высотные параметры шероховатости. Получение меньших высотных параметров шероховатости при использовании более твердых кругов объясняется меньшим выкрашиванием а.з. при правке.

К. Ванатабэ [168] получил следующую зависимость шероховатости от характеристики круга:

$$Ra \approx H_k^{-(0,5-1,0)} \cdot C_m^{-(0,5-1,2)} \quad (1.2.11)$$

где  $H_k$  – твердость круга, обозначаемая порядковым № по шкале Нортона;

$C_m$  – структура круга (процент содержания абразивного зерна в объеме круга).

На рис. 1.2.1 показана зависимость шероховатости от твердости круга при разной зернистости.

По исследованию других авторов, эта зависимость (рис. 1.2.2) не носит монотонного характера: сначала с увеличением твердости круга уменьшается шероховатость, с дальнейшим увеличением твердости шероховатость (по Ra) возрастает.

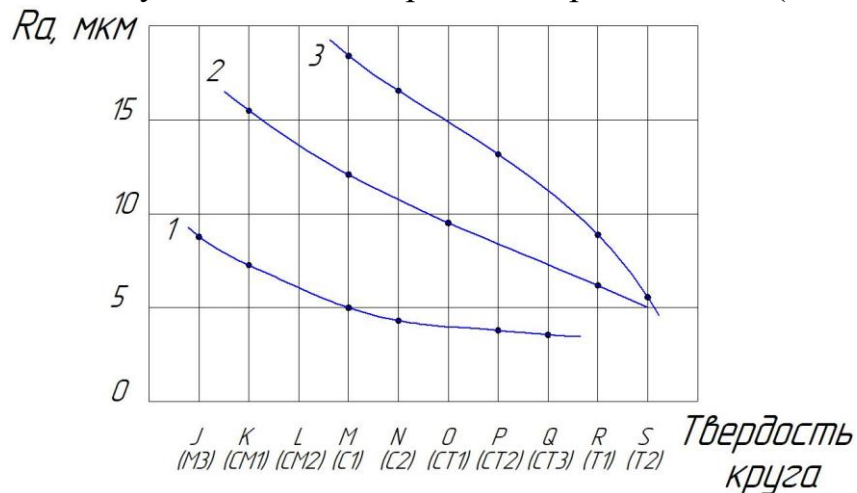


Рис. 1.2.1 – Зависимость высоты шероховатостей Ra от твердости кругов при разной их зернистости: 1- зернистость F90(16); 2 – зернистость F36(50); 3 – зернистость F24(80)

Данный факт объясняется изменением характера работы круга. С возрастанием твердости круга происходит переход из области смешанного износа инструмента в период работы с налипанием обрабатываемого материала на поверхность

зерен, что приводит к формированию более глубоких микроцарапин и соответственно увеличению параметра шероховатости поверхности, что подтверждается и исследованиями Л. Ландберга [169].

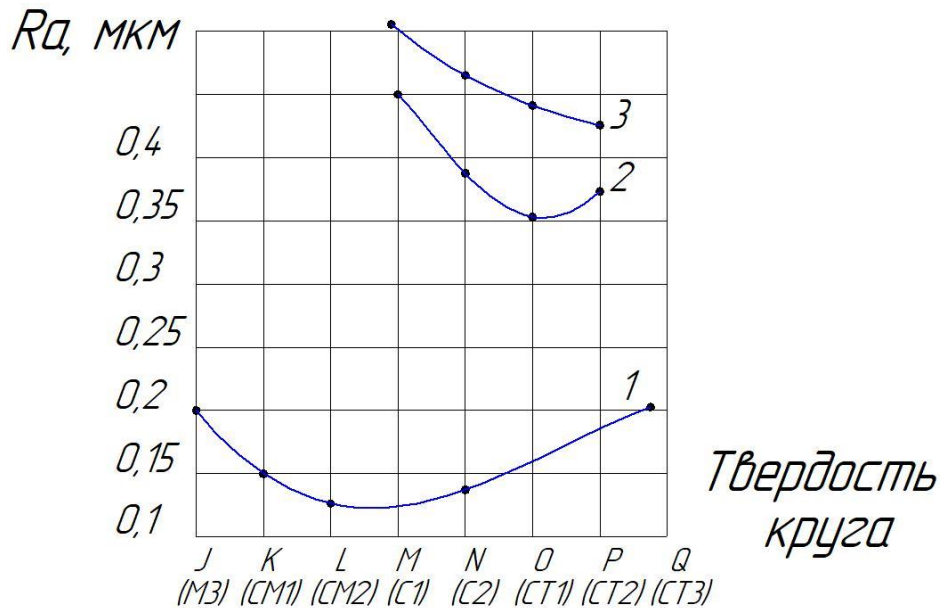


Рис. 1.2.2 – Зависимость шероховатости  $Ra$  от твердости круга:  
 1 – по результатам А.А. Михайлова для круглого наружного шлифования;  
 2 и 3 – для разрезания абразивными кругами по данным А.В. Смагина

Л.И. Залкинд в работе [35] показал, что с ростом величины подачи на один оборот круга при алмазной правке характеризуется уменьшением высотных параметров шероховатости. Автором установлена зависимость шероховатости по  $Ra$  от продольной подачи на 1 оборот круга в процессе правки инструментом из алмазозаменителя [36]. В зоне же обычной правки круга данная зависимость имеет линейный характер:

$$Ra = 0,4 + 0,00025s_0, \text{ мкм} \quad (1.2.12)$$

В зоне тонкой правки круга зависимость шероховатости от продольной подачи круга носит гиперболический характер:

$$Ra = 0,445 - \frac{2,88}{s_0 - 0,22}, \text{ мкм} \quad (1.2.13)$$

Е.А. Владецкая в работе [37] приводит зависимости для расчета шероховатости поверхности (1.2.14-1.2.17), которые в совокупности с зависимостями, характеризующими параметры дефектного слоя, позволяют аналитически рассчитывать и прогнозировать состояние поверхностного слоя после абразивной обработки.

$$Ra_n = H - 2,948 \cdot \sqrt{\frac{V_u \cdot t_\phi^{1.5}}{n_3 \cdot (V_k + V_u) \cdot l \cdot \sqrt{D_\exists}}} \quad (1.2.14)$$

$$Rz_n = \sqrt{\frac{V_u \cdot t_\phi^{1.5}}{\pi \cdot K_C \cdot (V_k + V_u) \cdot n_3 \cdot \sqrt{D_\exists} \cdot \rho \cdot \sum_{i=0}^n \left( W_m - \sum_{j=1}^i \Delta r_j \right)}} \quad (1.2.15)$$

где  $H$  – величина слоя, в котором распределена шероховатость;  
 $\Delta r$  – сьем материала.

$$H = t_\phi - \Delta r, \quad (1.2.16)$$

$l$  – базовая длина;

$K_C$  – коэффициент стружкообразования;

$P$  – радиус округления вершины резца;

$D_\exists$  – эквивалентный диаметр;

$V_k, V_u$  – соответственно, окружная скорость круга и заготовки;

$n_3$  – количество зерен в единице объема рабочего слоя ШК;

$t_\phi$  – фактическая глубина микрорезания

$y$  – расстояние от условной наружной поверхности ШК до уровня, на котором рассчитывается сьем материала.

При определении  $Ra$  рекомендовано предварительно найти величину  $W_m$  – величина расстояния от самой глубокой впадины обработанной поверхности до средней линии профиля. При ориентировочных расчетах среднего арифметического отклонения профиля для вычисления  $W_m$  может быть использовано соотношение:

$$W = \frac{H}{2} \quad (1.2.17)$$

Фактическое значение среднего арифметического отклонения неровностей профиля определяется формулой:

$$Ra_\phi = \max \{ Ra_u, Ra_n \} \quad (1.2.18)$$

Смысл формулы (1.18) заключается в том, что за фактическое значение  $Ra$  принимается его значение, вычисляемое по формуле (1.2.14, 1.2.15) в том случае,

если суммарный съём металла  $\Delta$  достаточно велик по сравнению с высотой исходного слоя шероховатости. В противном случае  $Ra$  вычисляется по формуле:

$$Ra_u = \frac{\Delta^2}{2H} \cdot \left( \frac{\Delta^2}{2H} - 1 \right) + \frac{H}{4} \quad (1.2.19)$$

Полученные зависимости можно использовать для схем круглого наружного, внутреннего и плоского шлифования. Для других схем абразивно-алмазной обработки рекомендовано разрабатывать соответствующие модели.

В.А. Фадеев [38] выполнил теоретический анализ закономерностей обработки по упругой схеме с начальным натягом в технологической системе. Исследованиями установлены физические условия существенного повышения точности, качества и производительности обработки.

В результате математических вычислений и наложенных ограничений В.А. Фадеев приходит к выводу, что важнейшим условием повышения точности и производительности обработки следует считать увеличение отношения  $a/\rho$ . Так как толщина среза  $a$  с течением времени обработки непрерывно уменьшается, увеличить отношение  $a/\rho$  можно осуществить путем уменьшения радиуса округления режущей кромки инструмента  $\rho$ . Для этого необходимо использовать абразивные материалы, характеризующиеся большей остротой режущей кромки и отличающиеся высокой износостойкостью. В первую очередь, это широко применяемые на практике сверхтвёрдые синтетические материалы.

Таким образом, установлено, что в конечном итоге величина упругого перемещения  $u$  и параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  определяются из условия  $a_z/\rho=0,04$ , рассматривая  $a=R_{max}=u$ . Уменьшить значение  $a=R_{max}=u$  можно двумя путями: уменьшением радиуса округления режущей кромки  $\rho$  и предельного значения  $a_z/\rho$ , при котором возможен процесс стружкообразования. В первом случае необходимо при правке использовать методы, обеспечивающие микрорезание режущих кромок абразивных или алмазных зерен, а в процессе обработки, исключая их затупление. Во втором случае необходимо использовать методы обработки, позволяющие уменьшить предельное значение  $a_z/\rho$ , при котором возможен

процесс резания, т.е. методы обработки, расширяющие границы осуществления процесса резания.

Параметр шероховатости  $R_{max}$  при шлифовании образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью  $V_{det}$ , определяется зависимостью:

$$R_{max} = \sqrt{\frac{П \cdot c}{tg\gamma \cdot k \cdot (\pi \cdot tg\gamma \cdot S \cdot HV \cdot + 2 \cdot V_{кр} \cdot c \cdot \tau)}} \quad (1.2.20)$$

Из формулы делается вывод, что с течением времени обработки  $\tau$  параметр шероховатости  $R_{max}$  уменьшается. Более существенное влияние на параметр  $R_{max}$  оказывают параметры:  $П$  – величина снимаемого припуска,  $2\gamma$  – угол при вершине режущего зерна, имеющего конусообразную форму,  $k$  – поверхностная концентрация зерен. Важнейшим условием уменьшения параметра  $R_{max}$  следует рассматривать увеличение  $k$ , т.к. увеличение  $\gamma$  ведет к уменьшению отношения  $a_z/\rho$ , увеличению силовой напряженности и ухудшению процесса резания.

Р.Г. Гришин [39] считает, что увеличение рабочей скорости ШК сопровождается увеличением производительности процесса обработки и улучшением качественных характеристик обработанных поверхностей. Однако процесс внедрения высокоскоростного шлифования сдерживается низкой стойкостью и прочностью отечественных кругов.

Анализ вышеуказанных работ исследователей показал, что авторы при оценке параметров микрорельефа отшлифованной поверхности используют принципы теории вероятности, строят эмпирические и имитационные модели с большим количеством характеристик и коэффициентов.

### **1.3. Структурно-фазовый состав и микротвердость поверхностного слоя шлифованных деталей из цементируемых сталей**

Рассматривая строение поверхностного слоя (ПС) металла, следует иметь в виду, что оно резко отличается от основного материала, так как несет на себе следы технологического процесса обработки, в результате которого, как правило, об-

разуется слой с искаженной структурой. Кроме того, при эксплуатации изделия постоянно идет процесс изменения свойств ПС из-за силовых, температурных, окислительных и других воздействий.

Пирозерская О. Л. [26] утверждает, что отличительной особенностью шлифования является то, что в ПС детали формируются ТОН сжатия. Это приводит к увеличению ее долговечности и износостойкости. Особенно важно, по её мнению, что благоприятная эпюра технологических остаточных напряжений наблюдается как при многоходовой, так и при глубинной схеме шлифования. Однако основная масса исследователей придерживается противоположной точки зрения. Так, Иванова Т.И. в работе [40] сообщает, что из-за интенсивного тепловыделения в процессе шлифования происходят структурно-фазовые изменения металла в поверхностном слое и появляются ТОН растяжения на глубину от десятков до сотен микрон. При шлифовании заготовок из закаленных высокоуглеродистых и легированных сталей (в том числе - цементируемых) происходит частичный отпуск поверхностного слоя с образованием смешанной структуры и уменьшением твердости, а также вторичная закалка металла, находящегося на отпущенном более мягком слое, который постепенно проходит через все этапы отпуска в исходную структуру закалки. В связи с этим при шлифовании закаленных высокоуглеродистых и цементированных сталей получают многослойные структурные образования, которые образуются вследствие последовательной передачи тепла различным объемам металла. Структурным и фазовым превращениям поверхностного слоя при шлифовании подвержены только предварительно закаленные стали, что зависит от скоростей нагрева и охлаждения объемов материала, входящих в зону контакта круга с заготовкой. Скорость нагрева металла достигает в этом случае тысячи градусов в секунду. Исходная перлитная структура отожжённой стали при таких скоростях нагрева может не превратиться в аустенит, так как диффузный характер превращения требует некоторого промежутка времени. Если перлитная структура стали при нагреве не превратится в аустенит, то и после ее охлаждения она останется прежней. Если же перлит превратится в аустенит, то структура после охлаждения меняется по глубине и соответствует скорости остывания ме-

талла (мартенсит, трооститомартенсит, троостит, сорбит, мелкопластинчатый перлит, крупнопластинчатый перлит).

Если осуществлять шлифование заготовок из цементируемой стали с мартенситной структурой, то ее переход в аустенит потребует незначительного времени для диффузионных процессов, и аустенит превращается в мартенсито-аустенит. В результате на обработанной поверхности образуется твердая хрупкая корочка, расположенная на сильно отпущенном основании.

Автор работы [40] приводит значения твердости ПС цементируемой стали в соответствии со структурными составляющими: твердость поверхности мартенситной структуры превышает HRC 60, троостомартенситной фазы – HRC 45-55, троостита – HRC 40, сорбита – HRC 30 и крупнопластинчатой перлитной структуры – HRC 15.

Увеличение температурного воздействия при шлифовании на заготовку из цементируемых сталей (например, вследствие повышения производительности обработки) приводит к формированию поверхностных слоев с сильно измененным структурно-фазовым состоянием, которые четко выделяются после травления микрошлифов в виде темных участков исследуемых цементируемых сталей [41]. Данный процесс сопровождается фазовыми превращениями, связанными с распадом исходных поверхностных метастабильных структур, например мартенситных, и созданием новых структур в ходе вторичной закалки. Толщина упроченного поверхностного слоя в этих условиях достигает нескольких десятых миллиметра и зависит от глубины нагрева материала до температур выше критических точек. Следует заметить, что величины критических точек в значительной степени определяются деформацией структуры металла, скоростью его нагрева и охлаждения в ходе абразивной обработки.

В подтверждение полученных Ивановой Т. И. результатов можно привести научную работу по исследованию мартенситных превращений в поверхностном слое шлифуемых закаленных стальных деталей [170]. Ее авторы констатируют, что в процессе абразивной обработки цементированных и закаленных сталей на обработанных поверхностях деталей обнаруживается 40-60% остаточного аусте-

нита. Аналогичное заключение при шлифовании закаленной стали приводит в своей монографии Маслов Е. Н.: «...поверхностные слои содержат гораздо больше аустенита (в процентах), чем его образуется при обычной закалке» [13]. Такой феномен (со слов авторов работы [170]) наблюдается, например, при шлифовании закаленной стали ШХ15. Это обосновано тем фактом, что находящийся при температуре выше  $A_{c1}$  в термодинамически стабильном состоянии аустенит в процессе шлифования подвергается интенсивному пластическому деформированию. Учитывая, что температура рекристаллизации для таких сталей составляет порядка  $1077\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то для них возможен один из двух следующих вариантов случаев:

1) при температуре нагрева поверхности ниже указанного значения процесс рекристаллизации не наблюдается;

2) при температуре нагрева поверхности выше указанного значения процесс рекристаллизации осуществляется не полностью ввиду кратковременной выдержки.

Таким образом, мартенситное превращение осуществляется не полностью, кристаллическая решетка подвергается серьезным искажениям, ввиду чего остаточная аустенитная структура сохраняет свое состояние, а образующийся поверхностный слой характеризуется сравнительно высокой твердостью и хрупкостью, за счет достаточно высокого содержания в ней мартенсита.

В другой статье [171] эти же авторы утверждают, что ввиду высокой скорости нагрева (около  $1,5 \cdot 10^{10}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) при шлифовании поверхностей цементируемых и закаленных сталей процесс диффузионного мартенситно-аустенитного превращения невозможен. Однако, как показали результаты исследования, при этом возможен процесс обратного мартенситного превращения без диффузионного сдвига под действием мгновенной температуры. В этом случае образование аустенита возможно при заметно меньшей температуре вследствие давления зерен шлифовального круга на обрабатываемую стальную поверхность, величина которого может достигать до 20 ГПа. Следует отметить, что для инициирования мгновенной температуры в зоне контакта абразива с заготовкой предъявляются особые требования. Например, возникновение мгновенной температуры возможно при

удалении припуска 0,01-0,025 мм крупнозернистым кругом с размером абразивного зерна 400/250.

Существенное отличие структурно-фазового превращения в данном случае заключается в бездиффузионном превращении мартенсита в аустенит без возникновения слоя перлита. Этот факт обусловлен сравнительной кратковременностью протекаемого процесса, из-за чего перлитное превращение не успевает произойти.

Башутиным С.Г. [41] установлено, что снижение термического воздействия на обрабатываемый материал (сталь 9ХС) путем тщательной правки круга, уменьшения глубины шлифования (до 5...6 мкм) и повышения скорости перемещения заготовки (до 25...30 м/мин) способствует формированию в металле более равномерного структурно-фазового состояния.

Анализ рассмотренных выше работ показывает, что структура поверхностного слоя цементированных заготовок различна и сильно зависит от метода их обработки и элементов режима шлифования. Специфика структурно-фазовых превращений поверхностного слоя закаленных и цементированных сталей изучена недостаточно глубоко. Существует вероятность, что мартенситная структура цементированной заготовки в процессе шлифования превратится в аустенит за счет так называемого эффекта «вторичной закалки на аустенит. При этом процентное содержание аустенита в поверхностном слое цементированной закаленной стали после операции шлифования значительно выше, чем было в нем после закалки материала.

Данные исследователей по структуре остаточных напряжений и величине микротвердости у отшлифованных цементированных заготовок противоречивы.

Все вышесказанное приводит к выводу, что необходимо проведение дополнительных исследований по оценке основных эксплуатационных характеристик поверхностного слоя цементированных поверхностей деталей, полученных на шлифовальных операциях.

#### 1.4. Обзор существующих моделей абразивного зерна и рабочей поверхности шлифовального круга

Процесс шлифования является весьма сложным процессом резания, имеющим свои специфические особенности, которыми он отличается от процессов резания металлов лезвийным инструментом с правильной геометрией.

В связи с тем, что шлифовальное зерно является продуктом механического дробления, то его частицы, представляющие собой осколки слитков абразива, имеют произвольную форму. Она может изменяться в широком диапазоне - от иглообразных, пластинчатых разновидностей до сферообразных [42, 43].

Строгого критерия оценки встречающихся форм зерен до настоящего времени не разработано. Существует терминологическое описание конфигурации зерен, выражающееся чаще всего через понятие изометрическая, промежуточная и осколочная форма [44-47]. Согласно этой классификации изометрическими считают те зерна, которые имеют форму, близкую к сфере, осколочными - подобные пластинкам, иглам, а промежуточными - соответствующие форме куба, призмы и др. фигур.

Четкого различия между перечисленными терминами нет, также, как и нет ограничений в выборе самих терминов. Например, по мнению Х. Опитца [172], все многообразие форм зерен целесообразно делить на четыре группы: изометрические, пластинчатые, иглообразные и комбинированные (из предыдущих групп).

По А.М. Вульфу [48, стр. 420], форма зерен количественно оценивается коэффициентом  $i$ , равным отношению радиусов окружности, условно вписанной в контур проекции зерна и описанной вокруг него.

А.М. Вульф утверждает, что размеры зерен характеризуются их длиной  $L$ , высотой  $h$  и шириной  $b$ . Многообразие форм абразивных зерен сводят к следующим разновидностям:

- 1) изометричные зерна — наиболее прочные и наилучшие по абразивной способности;
- 2) пластинчатые — менее прочные;

3) мечевидные — удлиненной формы, как и пластинчатые, считаются иногда дефектными по форме и строению, склонны к быстрому разрушению.

Абразивные зерна характеризуются также состоянием поверхности (гладкая, шероховатая), состоянием кромок и выступов (острые, закругленные, зазубренные и т. п.). С увеличением размера зерна возрастает радиус закругления его режущих кромок  $\rho$ , при разрушении их в процессе резания острота увеличивается. У подавляющего большинства зерен углы при вершинах зерен — тупые ( $>90^\circ$ ) и, следовательно, при шлифовании должны быть относительно большие радиальные силы, нормальные к обработанной поверхности.

Ильичев Л.Л., Карпов А.Б. [49, 50] используют при описании форм зерен такие термины, как "мечевидный", "игольчатый" и т.д.

В настоящий момент целесообразно иметь более точную классификацию зерен по форме, которая давала бы им не только качественную, но и количественную характеристику. Известны попытки решения этого вопроса, основанные на представлении абразивного зерна в форме гипотетического двухмерного прямоугольника или трехмерного параллелепипеда со сторонами соответственно  $l_1, l_2$  и  $l_1, l_2, l_3$ . В этом случае изометрическими считаются такие зерна, у которых стороны соотносятся как 1:1:1, иглообразными - 1:0,33:0,33, а пластинчатыми — с соотношением 1:1:0,3.

Следует отметить, что специфика процесса получения зерен дроблением абразивных слитков на шаровых мельницах с одновременным перемешиванием массы образующихся частиц не позволяет им принимать прямоугольные формы.

Более свойственна зернам в таком процессе овализация и приближение к округлым формам. По этой причине предпочтительней соотносить форму реальных зерен с формой сферы (в трехмерной системе измерений) или круга (в двухмерных координатах) [51].

На рис.1.4.1 представлены зарисовки наиболее распространенных форм абразивных зерен электрокорунда зернистости 32 [52]. Часто встречающиеся геомет-

рические формы абразивных зерен напоминают октаэдр или восьмигранную пирамиду (рис. 1.4.1, а).

В значительном количестве встречаются абразивные зерна, напоминающие трапециод тригональный (рис.1.4.1, б). Встречаются также абразивные зерна, по своей форме напоминающие ромбический тетраэдр (рис. 1.4.1, в) и даже призму трехгранную (рис.1.4.1, г).

Все разнообразие геометрических форм абразивных зерен представленными на рисунке 1.4.1 не ограничивается. Встречаются также абразивные зерна более сложной формы в виде сростков кристаллов неправильной формы (кристаллических агрегатов). Данные частицы абразива обычно имеют дипирамидальную ориентировку [52].

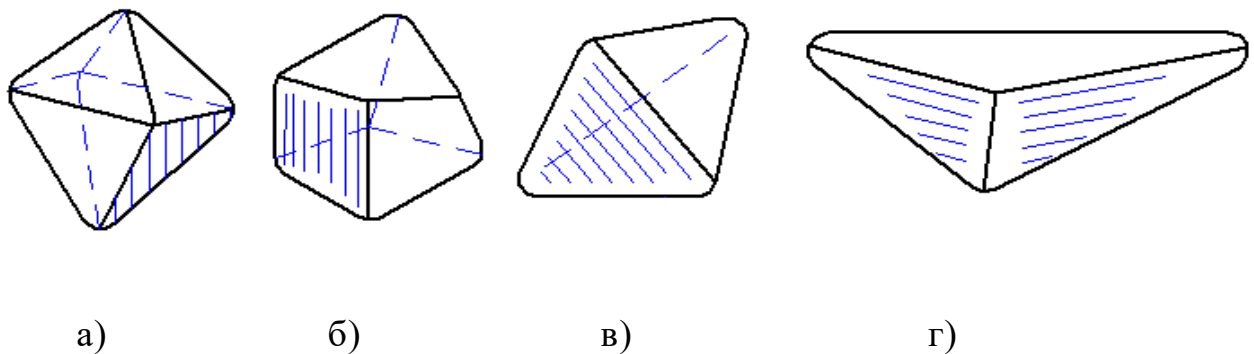


Рис.1.4.1. Модели формы абразивных зерен в виде:  
а) октаэдра; б) трапециода тригонального; в) тетраэдра; г) призмы трехгранной

Согласно исследованиям Г.М. Ипполитова [53, стр. 67], действующая технология производства абразивных материалов определяет различные условия для роста кристаллов. Вследствие этого зерна абразивных материалов не получают при дроблении определенной и однородной формы. Среди них имеются зерна, приближающиеся к неправильным пирамидальным, кубическим, шаровидным многогранникам различных форм, пластинкам и другим весьма разнообразным формам материала.

Вместе с тем форма зерен, величина углов, острота и прямолинейность кромок оказывают существенное влияние на их абразивную способность, износ и механическую прочность, а также на силу сцепления зерен со свя-

зующим веществом и на однородность абразивных инструментов по их твердости. Каждое абразивное зерно, участвующее в резании, является резцом. Однако, по мнению Л.А. Глейзера, для средних условий шлифования таких зерен на рабочей поверхности шлифовального круга не более 25% [54]. Отсюда его наивыгоднейшей формой должна быть такая, которая обеспечивает при любом его расположении максимальную работоспособность. Такой формой является, по мнению автора, сфера, так как данная геометрическая фигура лучше сопротивляется скалывающим силам, возникающим при шлифовании, и обеспечивает более высокую шлифующую способность и износостойкость [53].

В частности, форма зерен зависит и от применяемых средств дробления: при дроблении на вальцах получаются зерна с более острыми углами и гранями, чем при дроблении в шаровых или стержневых мельницах, где зерна получают форму с большими радиусами округлений.

Прочность зерен зависит также от вида абразивного материала и их размеров.

А.Н. Резников в своей работе [55, стр. 233] предполагает, что абразивные и алмазные зерна не имеют строгой формы. Однако из многократных наблюдений следует, что контуры абразивных и, в особенности, алмазных зерен удовлетворительно описываются эллипсами, большая ось которых проходит через наибольшую диагональ данного сечения зерна. Это видно из рис.1.4.2, на котором приведены контуры произвольно выбранных зерен синтетических алмазов АСО25, зарисованные через экран микроскопа [55]. Аналогичные результаты получены и для других типоразмеров зерен в разнообразных положениях на предметном столике микроскопа [55]. Можно предположить, что в любом плоском сечении, проведенном через наибольший размер зерна, контур последнего удовлетворительно описывается эллипсом, а само зерно в первом приближении можно описать эллипсоидом вращения.

В работе [55] А.Н. Резников указывает, что измерения, проведенные отечественными и зарубежными исследователями, а также значительное количество измерений, выполненных в Куйбышевском политехническом институте, показали, что между площадью сечения зерна и площадью круга, описанного вокруг данного сечения, существует, практически, постоянное отношение 0,5—0,6. Обозначая это отношение в общем виде  $\alpha_0$ , можем рассчитать малую ось эллипса, описывающего контур сечения каждого из зерен (рис. 1.4.2), по формуле  $\alpha = \alpha_0 \cdot x$  и далее объем зерна по формуле  $\omega(x) = \alpha \cdot \frac{\pi \cdot x^3}{6}$ , где  $\alpha = \alpha_0^2$ .

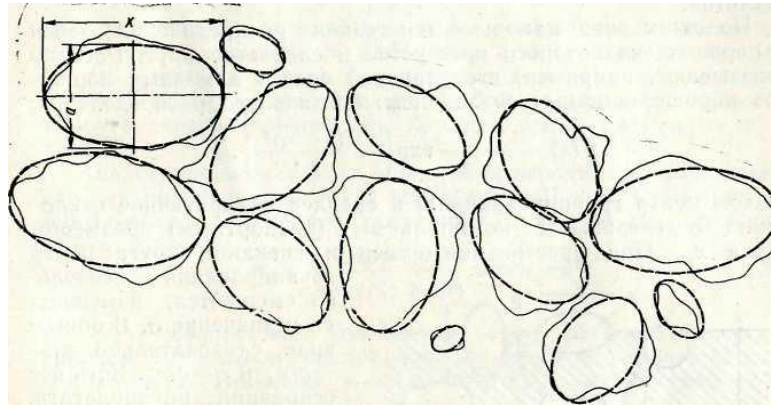


Рис.1.4.2. Контурные абразивных зерен и их описание

Исходя из исследований НИИМаш [56, стр.10], абразивное зерно представляет собой геометрическое тело неправильной формы. Условно его также можно охарактеризовать тремя размерами: длиной, шириной и высотой. Соотношение этих размеров определяет форму зерна. Основным размером зерна является его ширина.

Установлено, что определение среднего размера зерна и его среднеквадратического отклонения по весовым процентам фракций приводит к большим погрешностям в расчетах. Для определения фактического распределения размеров зерен в данном номере зернистости необходимо знать количественное содержание зерен во фракциях.

Целесообразнее среднюю ширину зерна и его среднеквадратическое отклонение для совокупности зерен, составляющих партию абразивного порошка данного номера зернистости, определить на основании анализа гра-

нулометрического состава абразивного порошка по фракциям, который обычно задается в весовых процентах.

В.Д. Дорофеев [57, стр. 96] считает, что на режущие свойства инструмента оказывает влияние не только на рельеф, но и субмикрорельеф зерен. Известно, что зерна из сверхтвердых материалов имеют достаточно развитую поверхность с малыми радиусами  $\rho$  и углами при вершинах кромок  $\varepsilon$ . В связи с этим шлифовальные инструменты, изготовленные из сверхтвердых материалов, обладают повышенными режущими свойствами. При профилировании и правке абразивных инструментов в зависимости от метода обработки зерно попадает под воздействие тех или иных процессов, в результате чего его субмикрорельеф (рис. 1.4.3.) претерпевает определенные изменения.

В. Д. Гончаров, Л. Н. Лукин [58, стр.10] полагают, что в процессе изготовления абразивных инструментов методом спекания и прессования происходит изменение гранулометрического состава зерен.

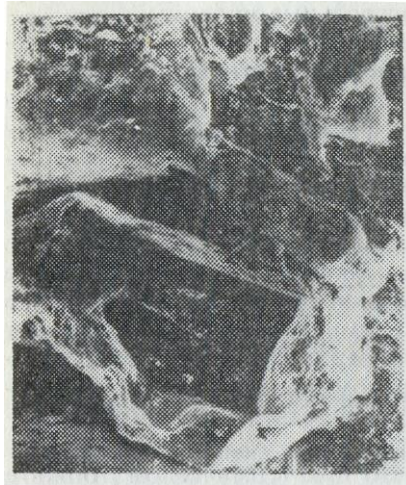


Рис.1.4.3. Субмикрорельеф абразивных зерен

В связи с этим ими для исследования были взяты зерна, рекуперированные из алмазоносного слоя хонинговальных (суперфинишных) брусков на связке М2-01(М1) (Томилинский завод алмазных инструментов) и на связке М5-04(МС1) (опытный завод ИСМ, г. Киев).

Геометрические и линейные параметры зерен измеряли микрофотографическим методом при помощи микроскопа МБИ-6 [58]. Зерна фо-

тографировали в проходящем свете при увеличении от X200 до X1100 в зависимости от зернистости брусков.

Длину и ширину зерен измеряли инструментальной линейкой, а высоту — при помощи оптической системы прибора ПМТ-3. Углы заострения и радиусы округления выступающих вершин измеряли специальными шаблонами, а длину периметров и площади проекции зерен, соответственно, курвиметром и планиметром. В общей сложности было проведено около 100000 замеров [58]. Для обработки такого количества экспериментальных данных использовали методы математической статистики и теории вероятности.

По исследованиям Семко М.Ф., Грабченко А.И. [59, стр.40], режущая способность абразивных зерен характеризуется суммарной длиной кромок, принимающих участие в резании, а также их остротой. Макрошероховатость зерен ( $k$ ) определяется как отношение длины контура их проекции ( $p_k$ ) к площади этого контура ( $S_k$ ).

$$k = \frac{p}{S}. \quad (1.4.1.)$$

При одинаковых свойствах материалов развитость режущей поверхности зерен оказывает преобладающее влияние на их поведение в работе.

Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глаговский [60, стр. 108] при анализе шлифзерна и шлифпорошков определяли длину и ширину зерен по условно проведенным взаимно перпендикулярным осям. За размер зерна абразивных материалов принималась его наибольшая ширина, а для алмаза — полусумма длины и ширины зерна.

Измерение выполняют в соответствии с ГОСТ 3647-80 методом микроскопического анализа. Определение размера и подсчет количества абразивных частиц выполняется последовательно, в нескольких полях зрения, передвигая препарат (подготовленную пробу материала с иммерсионной жидкостью) на предметном столе микроскопа в таком направлении, чтобы ис-

ключить повторный подсчет. Измерение выполняется с точностью до 0,5 деления шкалы окулярного микроскопа.

Оценка степени изометричности (формы) частиц осуществляется косвенным методом по значению массы образца в определенном объеме (насыпная масса) на приборах ПНВ-1 (шлифзерно и шлифматериалы) и ПНВ-М (микropорошки), с емкостью мерного стакана 100 см<sup>3</sup> [60].

Каменцев М.В. [61] к факторам, оказывающим влияние на процесс обработки шлифованием, относит форму и размеры зерен, утверждая, что правильная изометрическая форма полноценна, а следовательно, является предпочтительной.

В свою очередь в журнале «Steel» исследователи Gohn С. и Mc. Mullen [173] утверждают обратное, обращая внимание на то, что игольчатая форма абразивных зёрен, работающих в структуре шлифовального круга, повышает качественные и эксплуатационные параметры изготовленной детали, такие как: шероховатость обрабатываемой поверхности, износостойкость, прочность, а также теплосиловую напряженность процесса и мощность, затрачиваемую на шлифование.

Обобщим сведения о моделях абразивных зерен и параметрах их описывающих, представив в разделе в виде таблицы 1.4.1.

Таблица 1.4.1 – Моделирование геометрической формы абразивного зерна различными исследователями

№ пп	Автор	Геометрическая форма модели абразивного зерна	Параметры
1.	Вульф А.М.	Изомическая Пластинчатая Мечевидная	$L$ – длина $b$ – ширина $h$ – высота $\rho$ - радиус закругления режущей кромки
2.	Ипполитов Г.М.	Сфера	
3.	Резников А.Н.	Эллипс	$a, x$ – оси эллипса
4.	Гончаров В.Д. Лукин Л.Н.	Неправильная форма	$L$ – длина $b$ – ширина

			$h$ – высота $\rho$ - радиус закругления режущей кромки
5.	Семко М.Ф. Грабченко А.И.	Неправильная форма	$k$ – макрошероховатость зерен $p$ – длина контура проекций зерен $S$ – площадь контура проекций абразивных зерен
6.	Букин В.А. Глаговский Б.А. Ковальчук Ю.М.	Неправильная форма	$L, b$ – длина и ширина зерна, оцениваемые по взаимно перпендикулярным осям

Анализ многочисленных работ позволяет констатировать, что единого критерия оценки встречающихся в структуре шлифовального круга всех видов форм абразивных зерен до настоящего времени нет. Поэтому стоит задача разработки новых параметров, описывающих единую модель зерна и их количества, которая позволит получить, в свою очередь, математические зависимости для оценки их геометрических характеристик.

### 1.5. Методы определения количества абразивных зерен при моделировании шлифовальных кругов различной структуры

Вопрос определения количества зерен в объеме шлифовального круга решался многими исследователями [36, 53, 62-74, 174]. Анализ их работ позволил установить, что методы определения количества зерен в абразивном инструменте можно разделить на экспериментальные и теоретические. Методы определения количества зерен рассматриваются с точки зрения использования для этой цели современных компьютерных технологий.

Экспериментальные методы разделяются на прямые и косвенные. К прямым методам относят микростерофотографию [36] и подсчет количества зерен с использованием микроскопа [63]. Все остальные известные экспериментальные ме-

тоды относятся к косвенным и разделяются на две основные группы: метод отпечатков зерен на поверхности фольги, стекла, по числу тепловых импульсов, по количеству рисок после прохода зерен [66, 67, 174] и оценка профиля абразивного инструмента (профилографирование, оптическое изучение, топографирование) [64, 65].

Микростереофотограмметрическое исследование состоит в следующем [36]:

- после правки рабочая поверхность шлифовального круга (ШК) фотографируется через бинокулярный микроскоп со специальной насадкой;
- для оценки величины масштаба фотоснимков, т.е. общего увеличения с учетом фокусировки в объективе, окуляре и в фотокамере, при тех же условиях осуществляется фотографирование специальной масштабной линейки;
- фотографирование каждого участка производится посредством правого и левого тубуса микроскопа. С этой целью микроскоп устанавливается на станке;
- дальнейшая обработка снимков проводится на прецизионном стереометре (рис. 1.5.1).

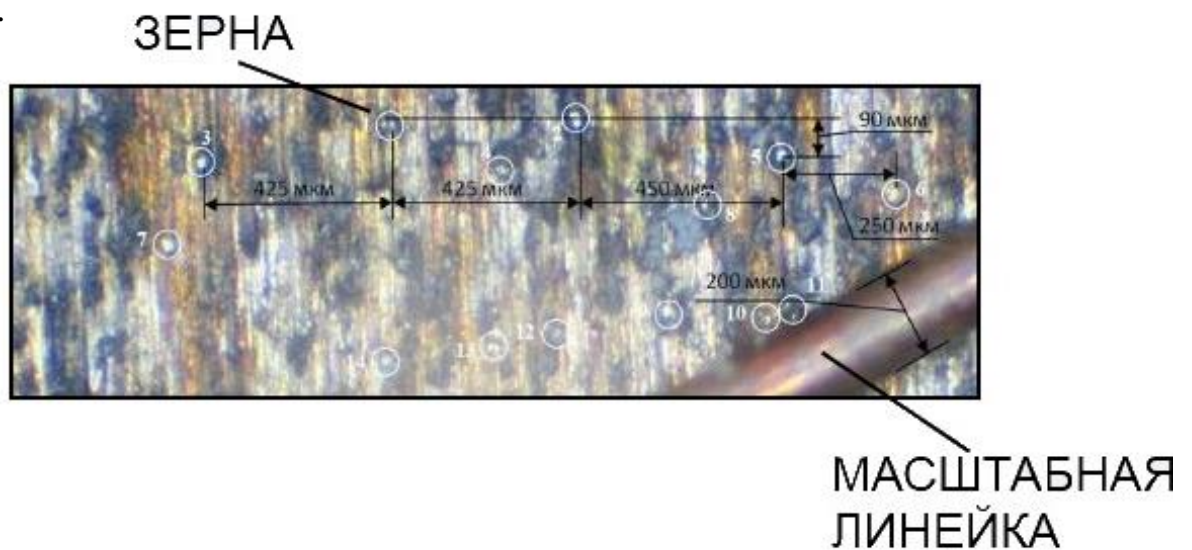


Рис. 1.5.1 – Снимок рабочей поверхности шлифовального круга на прецизионном стереометре

Метод микростереофотографии чрезвычайно громоздок. Для оценки рельефа поверхности требуется изготовление значительного количества фотоснимков участков поверхности круга. Определение разновысотности зерен при микростереофотограмметрическом исследовании трудоемкая задача. Первоначально требуется определить точку отсчета, что сделать крайне затруднительно. Основным

недостатком является то, что по фотографиям сложно выявить, что в действительности на фотографии абразивные зерна, а что блики.

Редько С.Г. и Королев А.В. [63] для исследований распределения а. з. на рабочей поверхности шлифовального круга измеряли расстояние между их вершинами в направлении к центру круга с помощью микроскопа. На рис. 1.5.2 представлено взаимное расположение микроскопа и ШК. В процессе исследований обивались совпадения горизонтальной направляющей окулярного микроскопа с вершиной зерна, после чего снимались показания. В дальнейшем круг медленно поворачивали до появления в окуляре вершины следующего зерна и снова снимались показания. Так, на измеряемом участке ШК оценивалось положение вершин всех последовательно расположенных зерен относительно точки отсчета.

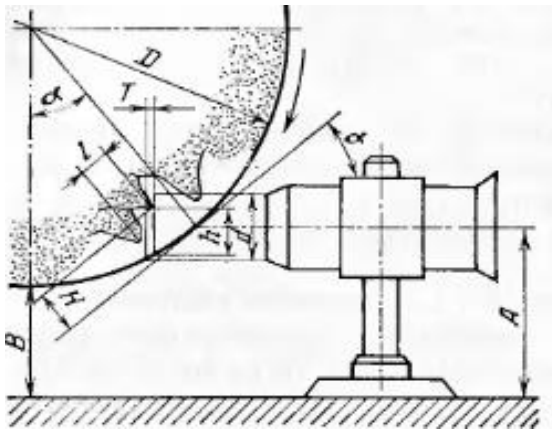


Рис. 1.5.2 – Схема экспериментальной установки для определения числа и разновысотности зерен

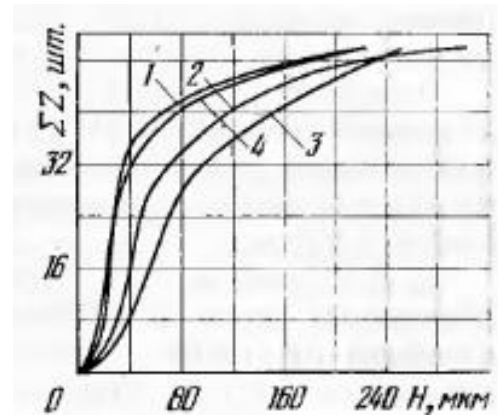


Рис. 1.5.3 – Функциональная зависимость распределения вершин абразивных зерен от глубины их залегания на рабочей поверхности круга

На рис. 1.5.3 представлена функциональная зависимость распределения зерен на рабочей поверхности круга *24A F46 L V* после правки твердосплавным роликом, полученная по результатам проведенных измерений. Процесс правки осуществлялся с продольной и поперечными подачами: 1 –  $S_{non}=0,005$  мм,  $H_0=28$  мкм,  $k=2,5$ ; 2 –  $S_{non}=0,015$  мм,  $H_0=48$  мкм,  $k=2$ ; 3 –  $S_{non}=0,04$  мм,  $H_0=72$  мкм,  $k=1,8$ ; 4 – правка алмазным карандашом,  $S_{np}=0,48$  м/мин,  $S_{non}=0,015$  мм,  $H_0=48$  мкм,  $k=1,5$ .

Потенциально режущие зерна, находящиеся под слоем связки в структуре круга, не учитывались. Бинокулярный микроскоп обладает малыми глубинами

резкости и поля зрения. В связи с этим в процессе исследований одновременно оценивалось лишь небольшое количество зерен. Несмотря на это рассмотренные методы дают достаточно точные результаты по общему количеству зерен.

Гусев В.В., Рожков Д.Б. [64] описывали профиль алмазного круга на металлической связке с помощью разработанного ими специального прибора, изображенного на рисунке 1.5.4:

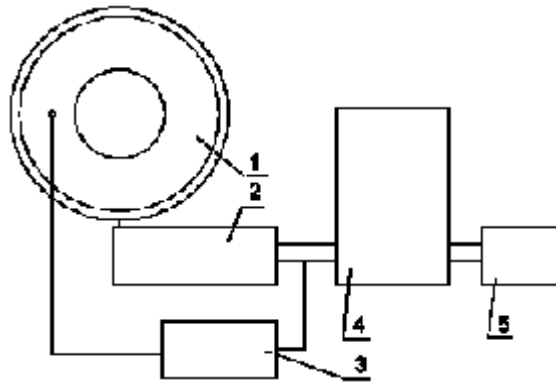


Рис. 1.5.4 – Установка для оценки профиля алмазного круга

1- алмазный круг; 2- приспособление для закрепления специального щупа профилографа-профилометра; 3- электронный блок; 4- профилограф-профилометр; 5- лента самопишущего прибора.

Для оценки разновысотности режущих а.з. на профилограмме выбиралась наиболее выступающая вершина. Через неё строилась линия нулевого уровня и в дальнейшем измерялось расстояние от нее до каждой потенциально режущей кромки. На основе полученных данных выстраивались гистограммы распределения зерен на рабочей поверхности круга и в среде Mathcad рассчитывали статистические характеристики.

В работе Прохоровой Е.В. [65] для исследования рельефа режущей поверхности алмазных шлифовальных кругов (РПК) использовалась аналогичная установка для профилографирования. Фиксацию профиля РПК с выделением зерна и связки осуществляли специальным прибором, к которому подключались два провода – один от шлифовального круга, другой от ощупывающей иглы. Координаты РПК поступали через согласующее устройство на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), смонтированный в системном блоке. Начало и конец записи управля-

ли с монитора. Результаты измерений обрабатывались с помощью программы, написанной на языке Delphi5.

Кениг В. и Лортц В. [174] приводят результаты своих исследований с применением специальной измерительной системы, считывающей топографии поверхностей шлифовальных кругов. На рис. 1.5.5 представлена зависимость количества динамических и статических режущих зерен шлифовального круга различных характеристик от глубины его профиля.

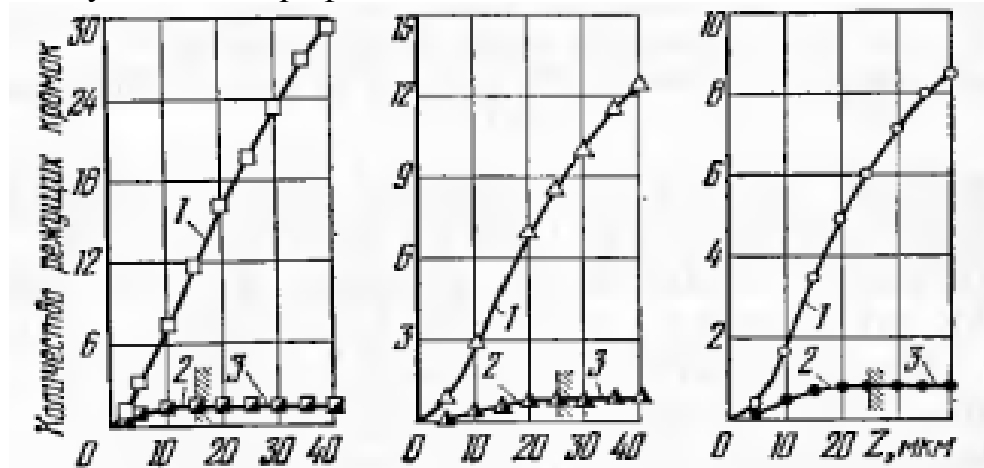


Рис. 1.5.5 – Изменение количества динамических и статических режущих зерен для шлифовальных кругов типа AA46M6V от глубины их профиля: статических (1), динамических (2) режущих зерен; 3 – предельное количество динамических режущих зерен.

Количество динамических режущих кромок составляет 5-12% от общего количества статических режущих кромок.

Профилографирование отличается простотой исполнения и достаточно большим объемом получаемой информации об объекте исследования. Однако, данный метод отличается систематической погрешностью, вызванной прямолинейным перемещением ощупывающего наконечника не по вершинам большинства режущих кромок, а по их боковым поверхностям. Подсчитываются зерна, лежащие на одной линии. В связи с этим определить их число на единице площади является достаточно сложной задачей. Кроме того, данный метод, в основе которого является пропускание электрического тока через абразивный инструмент, может быть использован лишь при измерениях кругов на металлической связке.

В работе [18] количество активных зерен определяется методом прокатки круга по фольге, толщина которой равна глубине резания.

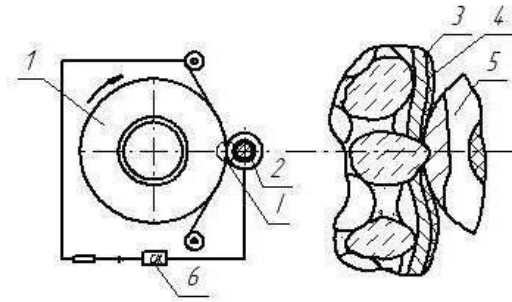


Рис. 1.5.6 - Схема экспресс - метода подсчета числа зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента

Сущность метода (рис. 1.5.6) заключается в автоматическом определении числа электрических импульсов, возникающих при прокатывании фольги 3 с изолирующим покрытием 4 между рабочей поверхностью круга 1 и специальным роликом 2. Фольга и пластина 5 ролика подключаются к источнику тока. В момент прохождения вершиной зерна через зону контакта ролика с кругом, оно, вдавливаясь в материал фольги, разрушает изолирующую пленку и замыкает электрическую цепь, а в момент выхода вершины зерна из зоны контакта электрическая цепь разрывается. Новый электрический импульс формируется при прохождении зоны контакта очередным абразивным зерном. Электрические импульсы регистрируются специальным счетчиком.

Количество абразивных зерен на единицу поверхности определяется как отношение числа зафиксированных импульсов  $m_{им}$  за время  $\tau$  к площади участка сканирования:

$$n_d = \frac{m_{им}}{H_p \cdot V_k \cdot \tau} \quad (1.5.1)$$

где  $V_k$  – рабочая скорость круга;  $H_p$  – толщина регистрирующей пластины ролика.

Точность определения числа зерен по методу прокатки по фольге зависит от вероятности наложения друг на друга отдельных электрических импульсов. Последнее зависит от конструктивных параметров считывающей пластины ролика.

Метод совмещения проекций зерен, используемый при исследованиях и названный «методом шлифования рисок», заключается в том, что на зеркально

доведенном цилиндрическом образце шлифуется риска. Линия пересечения поверхностей риски и образца очерчивает неровности круга, которые и изучаются в отраженном и увеличенном виде (рис. 1.5.7) [36].

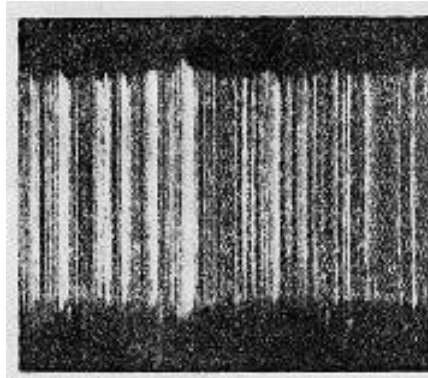


Рис. 1.5.7. Фотография риски на шлифованном образце

Определение микропрофиля круга путем шлифования рисок имеет весьма существенный недостаток, заключающийся в том, что на рисках могут быть отражены только неровности круга, получающиеся в результате его перекрестной правки алмазом. К тому же, решить, через сколько оборотов следует остановить ШК, точно невозможно. При данном методе некоторые зерна попадают в лунки, которые были образованы предыдущими зернами.

Метод царапания исследуемым кругом поверхности клина с малым углом подъема можно использовать для изучения формы, количества и характера распределения вершин (рис. 1.5.8) [64].

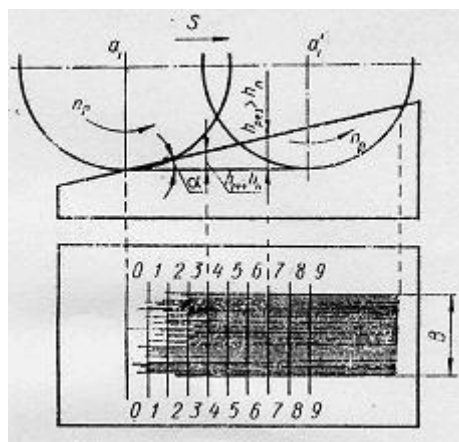


Рис. 1.5.8 – Схема царапания клина роликом

Исследуемый круг (ролик) устанавливают на шпиндель плоскошлифовального станка, приводят во вращение и врезают плоский клин. Зерна ролика, распо-

женные в рабочем поверхностном слое (РПС), придут в соприкосновение с клином в разных точках в соответствии с разновысотностью взаимного расположения. При отношении сторон клина, например 1:250, 1 мм продольного смещения соответствует разновысотности зерен в 4 мкм. Измеряя смещение царапин на клине с точностью 0,2 мм, удастся разделить зерна с разновысотностью 0,8-1 мкм. Точность повысится, если обработку царапин производить по фотоснимку с увеличением в 4-5 раз.

Данный метод учитывает такие обстоятельства, что режущие зерна не могут быть распределены с помощью статической модели круга не только из-за кинематического перекрытия их друг другом, но и из-за того, что число утраченных в динамике процесса зерен заранее неизвестно.

Редько С.Г. [67] подсчитывал тепловые импульсы по осциллограммам, полученным при шлифовании термопар малого диаметра. Круг испытывал динамические нагрузки и деформировался. Связанное с его деформацией изменение количества работающих зерен за время перемещения термопары в зоне резания легко улавливается осциллографом. По полученной осциллограмме определяется число импульсов, равное числу встреч термопары с абразивными зернами, интенсивность каждого импульса. Тепловые импульсы на ширине обрабатываемой поверхности, равной ширине термопары, фиксировали действие всех зерен, участвующих в работе.

Недостатком данного метода является то, что зарегистрированные импульсы отражают количество зерен при конкретных режимах резания, причем без разделения зерен на режущие и давящие. При данном методе тепловой импульс от трения со связкой также фиксируется, что значительно увеличивает погрешность.

В общем случае, при косвенных методах регистрируются не сами зерна, а только следы их взаимодействия с образцом, следовательно, данные методы не дают достаточно точного определения количества зерен.

В отличие от экспериментальных методов теоретически количество зерен определяют либо через структуру ШК, либо через плотность абразивного материала.

Резников А.Н. [68] определял общее номинальное количество алмазных зерен, располагающихся на  $1 \text{ мм}^2$  рабочей поверхности, по следующей формуле (1.5.2):

$$n_0 \approx \frac{K}{65x_n^2} \quad (1.5.2)$$

где  $x_n$  – номинальный, паспортный размер зерна.  $K$  – концентрация алмазов в круге.

В связи с неизбежной потерей зерен при шлифовании и правке фактическое их количество на поверхности круга будет меньше номинального  $n_0$ .

Маслов Е.Н. [69] приводит формулу для определения числа зерен в единице объема ( $1 \text{ мм}^3$ ) режущего слоя круга для алмазных и кубонитридных кругов.

$$n = 0,0047 \frac{k}{a^3 \mu} \quad (1.5.3)$$

где  $k$  – концентрация алмаза в инструменте;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий заполнение круга связкой и наполнителем.

Дитиненко С.А. с соавторами [70] число зерен, расположенных на рабочей поверхности шлифовального круга площадью  $B \cdot l$ , определяют по формуле:

$$n = k \cdot B \cdot l \quad (1.5.4)$$

где  $k$  – поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;

$B$  – ширина круга, м;  $l$  – длина рабочей поверхности круга, участвующая в формировании параметра шероховатости  $R_a$ , м.

Число зерен, проходящих через рассматриваемую точку за один оборот заготовки, выражается зависимостью

$$n_3 = k_3^1 \cdot l_k \cdot n_{3.o} = \frac{n_{3.o} \cdot k_3^1 \cdot l}{V_u} \sqrt{V_{k3}^2 + S_n^2} \quad (1.5.5)$$

где  $n_{3.o}$  – удельное количество зерен в одной линии резания;  $k_3^1 = 30 \cdot \omega_u \cdot t_B / \pi$  – коэффициент, учитывающий величину подачи круга за один оборот заготовки;  $t_B$  – время воздействия круга.

$$n_{3.o} \approx \sqrt{N_p} \quad (1.5.6)$$

где  $N_p$  – число зерен на единице площади шлифовального круга.

Используя приведенные выше зависимости для определения величины режущих зерен, выводим формулу:

$$n_z = \frac{l \cdot t_g}{\pi \cdot d} \cdot \sqrt{N_p} \cdot \sqrt{V_{k3}^2 + S_n^2} \quad (1.5.7)$$

Число зерен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, на единице площади круга зависит от величины углубления зерен и может быть найдено по формуле:

$$N_p = N_p^o + (N_{p.\max} - N_p^o) \cdot \frac{\Delta_{z.cp}}{\Delta_{z.\max}} \quad (1.5.8)$$

где  $N_{p.\max}$  – максимальное число режущих зерен, приходящихся на единицу площади круга на глубине слоя  $\Delta_z = \Delta_{z.\max}$ ;  $N_p^o$  – число зерен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью при отсутствии съема металла;  $\Delta_{z.\max}$  – максимальное заглубление зерен;  $\Delta_{z.cp}$  – среднестатистическое заглубление зерен.

Филимонов Л.Н. [71] для определения режущих кромок на определенном уровне  $t$  (при заданной глубине шлифования) использует интегральную функцию распределения, которую, если заменить суммой, имеет вид:

$$N_t = NA \sum_{x=0}^{x=t} t^{1-\nu} (1-t)^{1-\eta} \Delta t \quad (1.5.9)$$

где  $N$  – полное количество режущих кромок, приходящихся на 1 мм длины профиля.

В работе [71] приведены рассчитанные по формуле (1.6.9) значения  $N_t$  для различных уровней (таб.1.5.1).

Таблица 1.5.1 – Характеристика рельефа рабочих поверхностей шлифовальных кругов

Круг	$h$ , мкм	$N$ , шт/мм	$N_t$ шт, на уровнях, мкм			
			10	20	30	40
F46 К	330/300	3,2/3,5	0,53/0,49	0,85/0,78	1,10/1,05	1,30/1,27
F60 К	250/225	5,7/5,2	1,2/0,52	2,24/1,05	2,60/1,55	3,00/2,04
F90 К	170/145	6,5/5,7	1,68/0,60	2,70/1,20	3,46/1,77	4,00/230

F60 O	220/210	6,7/4,5	2,16/0,80	3,10/1,32	3,50/1,73	3,94/2,05
F60 M	230/210	6,0/5,5	1,55/1,03	2,25/1,65	2,75/2,14	3,16/2,54
F60 J	260/260	4,7/4,3	1,45/0,22	2,10/0,52	2,54/0,85	2,85/1,20

Примечание: В числителе круг после правки, в знаменателе – после шлифования.

Из этих данных хорошо видно влияние зернистости и твердости кругов, а также их износа во время шлифования на количество активных режущих кромок.

Козлов А.М. [72] разделяет абразивные зерна на рабочей поверхности инструмента на режуще-деформирующие и просто деформирующие. Процентное содержание режущих зерен принимает равным отношению количества зерен с ненулевой режущей площадью передней поверхности к общему количеству рабочих зерен  $N$ :

$$N_{реж} = \frac{\sum_{k3=1}^Z 1_{(S_p[k3]>0)}}{\sum_{k3=1}^Z 1_{((S_p[k3]+S_d[k3])>0)}} \times 100\%, \quad (1.5.10)$$

где индекс у единиц обозначает, что суммирование выполняется только при соответствующих условиях.

Количество деформирующих зерен

$$N_{деф} = \frac{\sum_{k3=1}^Z 1_{(S_d[k3]>0 \text{ и } S_p=0)}}{\sum_{k3=1}^Z 1_{((S_p[k3]+S_d[k3])>0)}} \times 100\% \quad (1.5.11)$$

Для определения количества абразивных зерен  $Z$ , принимающих участие в процессе обработки, рассчитывает среднестатистическое расстояние между зернами в связке.

Опуская промежуточные преобразования, получает, что количество абразивных зерен в единице объема абразивосодержащего материала будет вычисляться так:

$$Z = \frac{V_0 k}{100 \sum_{y=1}^{2b} \pi a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)} \quad (1.5.12)$$

где  $V_0$  – единичный объем рабочего слоя абразивного инструмента;  $k$  – объемная концентрация абразивного материала (в процентах);  $a$ ,  $b$  – полуоси эллипсоида вращения.

В работе [73] для расчетов автор принимает допущение, что форма абразивного зерна имеет вид шара. Равномерность распределения зерен достигается в соответствии со схемой (рис. 1.5.9).

В такой схеме на 100% реализуется возможность контактов поверхностей зерен – шаров. При этом один шар контактирует с 14 другими, на поверхности – с 9.

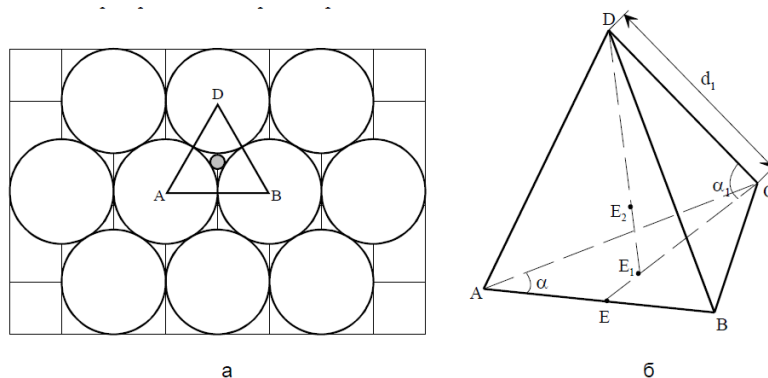


Рис. 1.5.9 – Схема максимальной упаковки зерен-шаров: а – общая структура упаковки; б – блок-схема четырех зерен-шаров; А, Б, С и D – центры шаров

Автор взял блок четырех зерен, каждый из которых контактирует с тремя остальными. Из таких блоков, связанных между собой, состоит структура материала инструмента. Багайсков А.С. связывает центры этих четырех зерен и получает равностороннюю пирамиду (рис. 1.5.9, б).

Количество зерен описывают зависимостью:

$$n_1 = \frac{V_0}{d_1^3 \sin \alpha_1} \quad (1.5.13)$$

Калинин Е.П. в своей работе [74] рассматривает зерна в виде материальных точек, расположенных по вершинам различного типа многогранников: куба, прямых правильных трехгранных призм, наклонных трехгранных призм и тетраэдров. Исследуется закономерность расположения абразивных зерен в объеме режущего слоя и на рабочей поверхности инструмента. При этом, автор считает, что

зерна распределены равномерно по всему режущему слою, с одинаковыми фактическими расстояниями.

По мнению автора, зерна распределяются в структуре круга, только согласно одной из приведенных схем (рис. 1.5.10).

В  $1 \text{ мм}^3$  содержится абразивных зерен:

$$n_1 = 1/V_{\text{зерна1}} = 1/l_{\phi}^3 \text{ штук (схема 1)} \quad (1.5.14)$$

$$n_2 = 1/V_{\text{зерна2}} = 1/(0,87l_{\phi}^3) = 1,16 \cdot 1/l_{\phi}^3 \text{ штук (схема 2)} \quad (1.5.15)$$

$$n_3 = 1/V_{\text{зерна3}} = 1/(0,71l_{\phi}^3) = 1,41 \cdot 1/l_{\phi}^3 \text{ штук (схема 3)} \quad (1.5.16)$$

$$n_4 = 1,41 \cdot 1/l_{\phi}^3 \text{ штук (тетраэдральная решетка)} \quad (1.5.17)$$

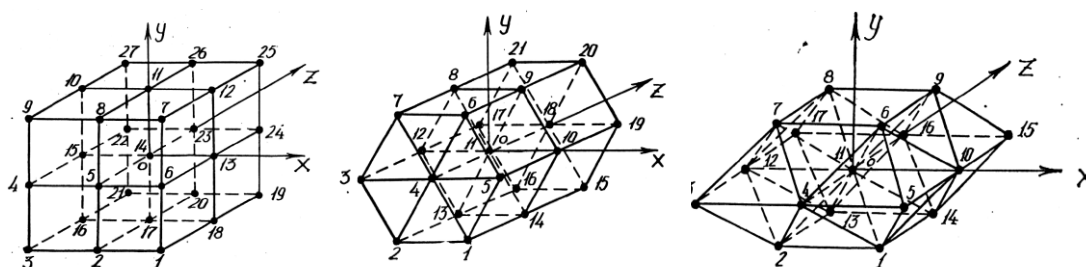


Рис. 1.5.10 – Схемы расположения абразивных зерен в пространственной решетке

1 – схема расположения абразивных зерен в пространственной решетке, образованной кубами; 2 – схема расположения абразивных зерен в пространственной решетке, образованной прямыми правильными трехгранными призмами; 3 – схема расположения абразивных зерен в пространственной решетке, образованной наклонными трехгранными призмами; 4 – расположение абразивных зерен в пространственной решетке, образованной тетраэдрами.

Исполитов Г.М. [53] определяет число зерен путем вычисления их в единице веса и далее в единице объема. Фактическое определение содержания зерен в единице веса, классифицированных в соответствии с нормами ГОСТа 3647-59 с точностью 10%, показывает, что в 1 г содержится следующее число зерен электрокорунда и карбида кремния.

При моделировании структуры ШК зернами, расположенными в узлах различных кристаллических решеток [73, 74], учитывается их объемное распределе-

ние, что более целостно отражает реальную картину в отличие от работ [68-72], в которых зерна располагаются на плоскости.

Таблица 1.5.2 – Количество зерен в 1 г

Зернистость №	F16	F20	F24	F36	F46	F60	F90
Число зерен в 1 г в шт. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	150	230	700	2300	6700	19500	75000
Число зерен в 1 г в шт. SiC	200	350	1000	3000	7300	23000	90000

В результате анализа установлено, что вышеприведенные методы позволяют оценить количество зерен где-то с достаточно большой погрешностью, о чем свидетельствуют данные таблицы 1.5.3 [72].

Таблица 1.5.3 – Сравнительный анализ экспериментальных исследований разных авторов

Автор	Номер зернистости	Количество зерен 1/мм <sup>2</sup>
Алексеев В.И.		14,0
Волский Н.М.		6,3
Дьяченко П.Е.		8,9
Зубарев Ю.М		1,8...8,9
Оробинский В.М.		6,8
Маслов Е.Н.		10,5
Никифоров И.Л.		1,4...12,4
Фирма Norton		5,2
Резников А.Н.		4,3
Рязанов Ф.А.		9,9
Ипполитов Г.М		9,9
Козлов А.М.		10,1
	F90	23,4
	F60	9,9
	F46	5,3
Редько С.Г.		8,0
	F90	1,223
	F60	0,863
	F46	0,429
Филимонов Л.Н.		7,1...8,9

	F90	1,7
	F60	1,35
	F46	0,36
Бишутин С.Г	F90	0,881
	F60	0,420
	F46	0,225
Якимов А.В.	Весовые части связка/абразив	
	100/450	14,2
	100/550	14,97
	100/900	16,0
	100/1100	17,97

В результате анализа результатов исследований в рассмотренных выше публикациях установлено, что вышеприведенные методы позволяют оценить количество зерен с достаточно большой погрешностью, о чем свидетельствуют данные таблицы 1.5.3.

Экспериментальные исследования дают разброс значений от 0,420 до 14,0 зерен на 1 мм<sup>2</sup> при одной зернистости, что объясняется недостаточной точностью этих методов и указанными недостатками.

Большинство экспериментальных методов могут быть использованы только для оценки кругов, у которых химический состав зерен и связки различен, а количество слоев а.з. невелико. Общеизвестно, что при шлифовании стальных и чугуновых заготовок используют многослойные электрокорундовый и карбидокремниевый круги на керамической связке. Поэтому для проведения экспериментов необходимы разработки и изготовление специальных устройств и приспособлений. Как правило, математические модели, полученные после обработки результатов экспериментальных исследований, являются адекватными только для условий проведения эксперимента, и имеют ограниченную возможность переноса на другие модели при иных входных параметрах.

При математическом же моделировании варьировать различными параметрами удобнее. Это не требует значительных материальных затрат. Данные методы

могут давать достаточно точные результаты, поскольку исключено влияние внешних факторов. Разумеется, что вводимые авторами различные допущения снижает точность теоретических методов.

Основным недостатком вышерассмотренных работ является то, что не раскрыт алгоритм перехода от структуры ШК к его рабочей поверхности.

На наш взгляд, математические модели необходимо использовать для определения количества зерен, а экспериментальные методы - для подтверждения полученных теоретических значений.

### **1.6. Основные методы компьютерного моделирования силовых характеристик процесса шлифования**

Любая технологическая операция абразивной обработки шлифованием поверхности металлической заготовки, как было указано ранее, представляет собой сложный процесс микрорезания, отличающийся от других способов механической обработки. Применение процедуры шлифования на финишной стадии формообразования осложняется повышенными требованиями к получаемой точности размеров и качеству обработанной поверхности. При этом, если на предстоящих шлифованию операциях допустима корректировка геометрических размеров, формы, шероховатости, волнистости и других параметров, то на стадии финишной обработки в связи с малыми значениями удаляемых припусков такая возможность либо имеет ряд ограничений, либо недопустима вовсе. По этой же причине обуславливается невозможность устранения шлифовочных дефектов, которые, как правило, образуются из-за неправильно подобранных режимов резания и переводят практически готовую деталь в производственный брак.

При осуществлении процесса шлифования важно уделять должное внимание не только получаемым в результате обработки деталям, но и самим абразивным инструментам. Как и для других режущих инструментов, их применение в производственном цикле нередко сопровождается случаями преждевременного выхода из строя, ввиду чего необходим контроль степени абразивного износа. Учитывая,

что технология шлифования сопровождается высокими рабочими скоростями шлифовального круга, в случае его непредвиденного разрушения возникает риск как повреждения обрабатываемой заготовки детали и шлифовального оборудования, так и механического травмирования человека, что недопустимо.

Подробный обзор выше приведённых проблем в области шлифования позволяет выделить класс задач, которые можно условно отнести к двум категориям. Первая категория типовых задач сфокусирована на анализе получения заданного качества и эксплуатационных характеристик обработанных деталей (шероховатость, волнистость, макрогеометрия, ТОН, фазовые превращения ПС, микротвердость, напряженно-деформированное состояние, механические характеристики и т.д.) после шлифования. Здесь оценивается влияние режимов резания, применяемого техпроцесса механической обработки, формы и размеров ШК и а.з.

Вторая категория имеет схожие задачи, что и первая, однако ориентирована по отношению к самим абразивным инструментам. В основном, исследования нацелены на рассмотрение вопросов о прочностных параметрах и характеристиках шлифовального круга, его абразивной износостойкости, возникающих при обработке всевозможных сил, действующих на а.з и круг в целом, микро- и макроструктуре шлифовальных кругов и др. В работе [75] Носов Н.В. и Кравченко Б.А. отмечают, что к основной причине разрушения абразивных инструментов относится действие различных силовых факторов – сил закрепления а. з. в шлифовальном круге, центробежных сил и возникающих сил резания. В свою очередь, комбинированное воздействие этих силовых факторов приводит к возникновению в шлифовальном круге сложного напряженного состояния, в сочетании с технологическими остаточными напряжениями, которое образует величину суммарных напряжений, выраженных следующей зависимостью:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\omega} + \sigma_R + \sigma_T, \quad (1.6.1)$$

где  $\sigma_{\omega}$  – напряжения, вызванные центробежными силами;  $\sigma_R$  – напряжения от сил резания;  $\sigma_T$  – технологические напряжения.

Изучение подобного напряженного состояния в материалах абразивных инструментов, как отмечает Шумячер В. М. с соавторами [76], крайне необходимо,

чтобы не допустить концентрации напряжений и образования трещин в связке. В связи с этим учет силовых процессов при шлифовании является важным критерием при решении проблем целостности используемых абразивных инструментов на всех уровнях исследования.

Следует отметить, что вышеизложенные и другие задачи, решаемые в рамках детализации процесса шлифования, в большинстве случаев являются достаточно трудоемкими и сложно реализуемыми даже при проведении экспериментальных исследований (как, например, анализ процесса формообразования стружки при резании [77]). В настоящее время в различных научных школах широко используются численные методы цифрового моделирования процессов шлифования. Для этой цели широко используются специальные программные пакеты компьютерного конечно-элементного анализа типа ANSYS, Solidworks, Abaqus, MSC.Patran-Nastran, LS-DYNA и др. Как отмечается в работе [175], процесс численного моделирования шлифования позволяет в значительной степени снизить экономические и временные затраты на реальное исследование процесса, заменяя натуральный эксперимент виртуальной аналогией. При этом полученные результаты имитационного моделирования и эмпирические данные реальных процессов абразивной обработки, как это отражается во многих литературных источниках [78, 175-178], хорошо согласуются между собой.

В качестве классификации подходов, разработанных на основе численного моделирования технологии шлифования, [75, 76, 79, 177] можно выделить следующие направления (относящиеся в общем случае и к механике обрабатываемых материалов заготовок, и к механике обрабатывающих абразивных инструментов):

- моделирование силовых процессов резания шлифованием;
- моделирование контактного взаимодействия зерен абразива и обрабатываемой поверхности;
- моделирование процессов изменения механических свойств материалов вследствие шлифования;
- моделирование динамических процессов шлифования.

Важно отметить, что указанные направления взаимосвязаны между собой силовой моделью, поскольку для описания механического поведения инструмента и заготовки зачастую используются всеобъемлющие аналитические зависимости [179]. Поэтому углубленное изучение процессов, возникающих при шлифовании, может затрагивать одновременно несколько связанных задач.

Общий подход к рассмотрению преобладающего количества задач математического описания шлифования сводится к моделированию резания материалов единичными абразивными зёрнами различной геометрической формы [79, 175, 176]. Как отмечается в работе [177], макромасштабные модели учитывают взаимодействие круга и заготовки в целом, в то время как микромасштабные модели позволяют сфокусироваться на отдельных взаимодействиях зёрна и заготовки. В последнем случае процедура микрорезания-шлифования единичным а.з. рассматривается как однолезвийная фрезерная обработка отдельной режущей кромкой со снятием стружки.

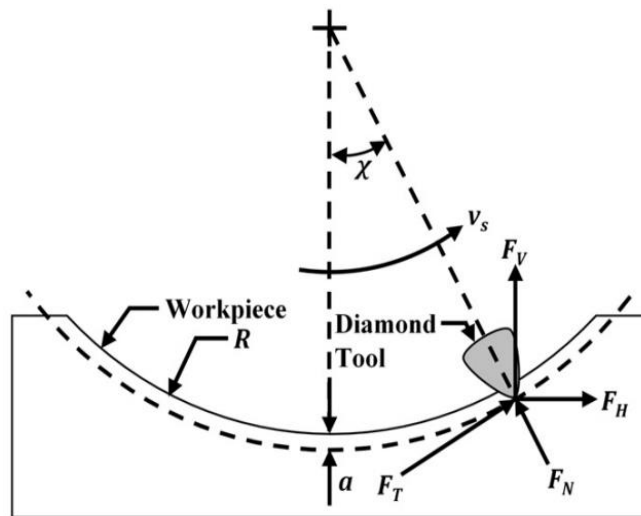


Рисунок 1.6.1 – Схематическое представление сил возникающих сил резания

Особое внимание при микромасштабном изучении процесса шлифования уделяется влиянию на возникающие в вершине единичного зёрна тангенциальные (или касательные)  $F_T$  и нормальные  $F_N$  составляющие силы резания (рис. 1.6.1), режимов резания, сил трения, структуры обрабатываемого материала заготовки и круга, а также и геометрии а.з.

Анализ научно-технической и патентной литературы с конца XX века по настоящее время представляет необозримое количество научных работ по методам численного исследования силовых процессов шлифования как среди отечественных, так и среди зарубежных ученых. В настоящем подразделе обозначим лишь самые значимые.

Так, в работе [176] процесс удаления материала (высокопрочная сталь AISI 4340) с помощью шлифования при разных режимах резания одиночным алмазным абразивом в виде полусферы моделировался в среде динамического нелинейного анализа LS-DYNA тремя последовательными фазами – притиранием, вспашкой и резанием (рис. 1.6.2).

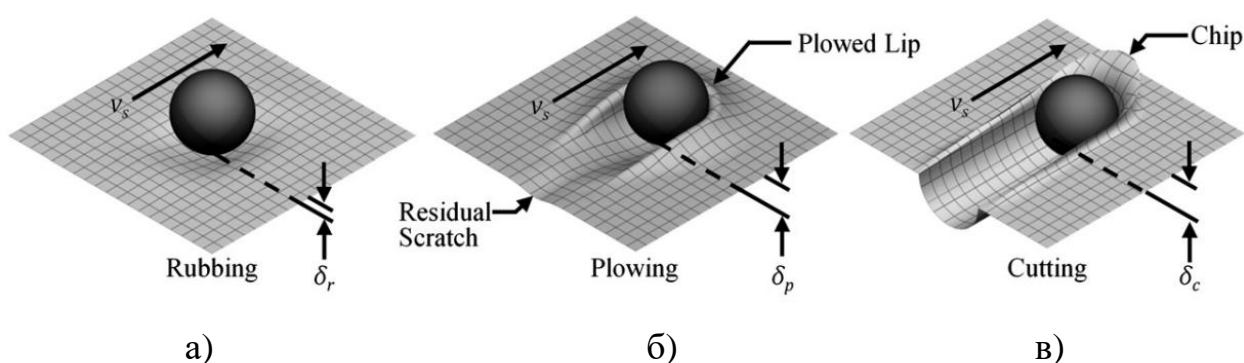


Рисунок 1.6.2 – Имитация удаления материала в программе LS-DYNA: притирание (а), вспашка (б) и резание (в) [176]. В результате было установлено, что нормальные силы резания увеличиваются с ростом скорости резания из-за деформационного упрочнения заготовки в зоне шлифования, а тангенциальные силы уменьшаются по причине снижения трения между инструментом и заготовкой.

Однако, как отмечают другие авторы в работе [88], на примере той же марки стали при моделировании задачи в программе Abaqus/Explicit, в условиях повышенных скоростей резания и малой интенсивности трения происходит скольжение стружки, вызывающей перегрев свыше 1000 °С в зоне резания (рис. 1.6.3) и чрезмерный износ режущего инструмента (вследствие значительного уровня возникающих касательных напряжений  $\tau_p = 500...700$  МПа), что значительно снижает его ресурс и может привести к разрушению. По этой причине данную проблему

следует рассматривать в рамках термомеханического анализа моделей инструмента и заготовки с применением метода конечных элементов [173].

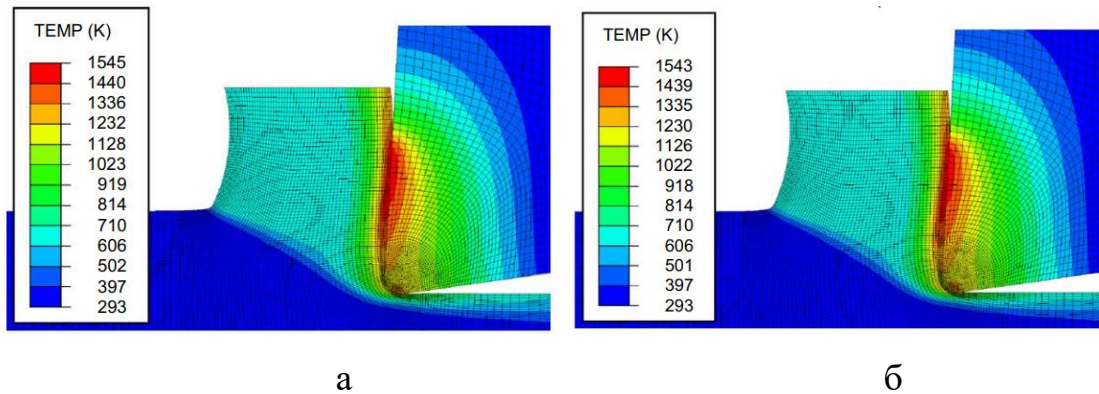


Рисунок 1.6.3 – Оценка распределения температуры в области контакта вершины режущей кромки с заготовкой из сплава AISI 4340 в программе Abaqus/Explicit: при  $\tau_p = 500$  МПа (а) и при 700 МПа (б) [172]

Необходимость в оценке механических и тепловых нагрузок при шлифовании заготовок из труднообрабатываемых материалов, таких как титановые сплавы, доказана в работе с использованием программы DEFORM 3D [175].

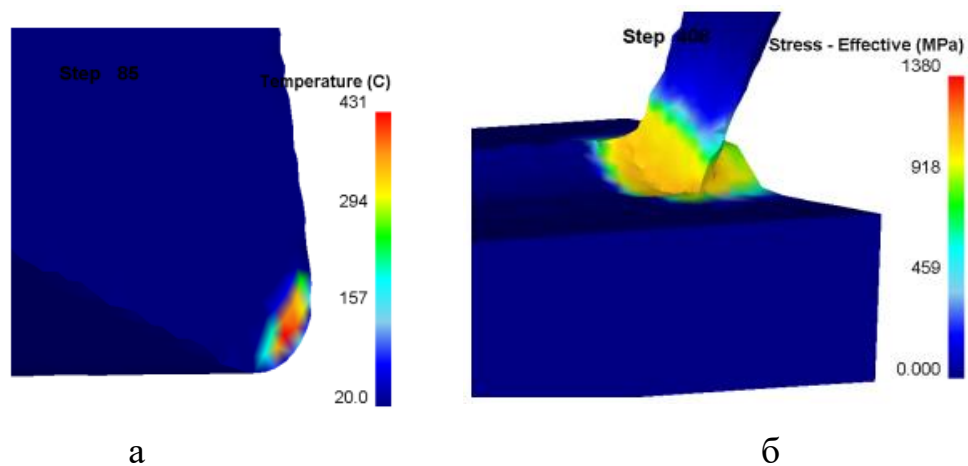


Рисунок 1.6.4. Расчет температуры (а) и эффективных напряжений (б) в программе DEFORM 3D в зоне контакта одиночного зерна с заготовкой из сплава Ti6Al4V

Авторы отмечают, что конечно-элементное прогнозирование значений тангенциальной силы резания и критической температуры в зоне микрорезания (рис. 1.6.4) на основе конечно-элементного анализа позволяет установить не только оп-

тимальные режимы резания, но и помогает в определении характеристик обработанной поверхности и прочностного ресурса абразивного инструмента.

Среди существующих публикаций на тему имитационного моделирования процесса шлифования следует отдельно выделить уникальную расчетно-экспериментальную работу [178].

Авторами были проведены модельные расчеты в конечно-элементной среде DEFORM 3D по исследованию влияния геометрии реально существующих абразивных зерен (угла при вершине  $\varepsilon$ , угла раскрытия  $\alpha$ , ширины  $b$  и длины  $l$  зоны резания) на эффективность съема металла.

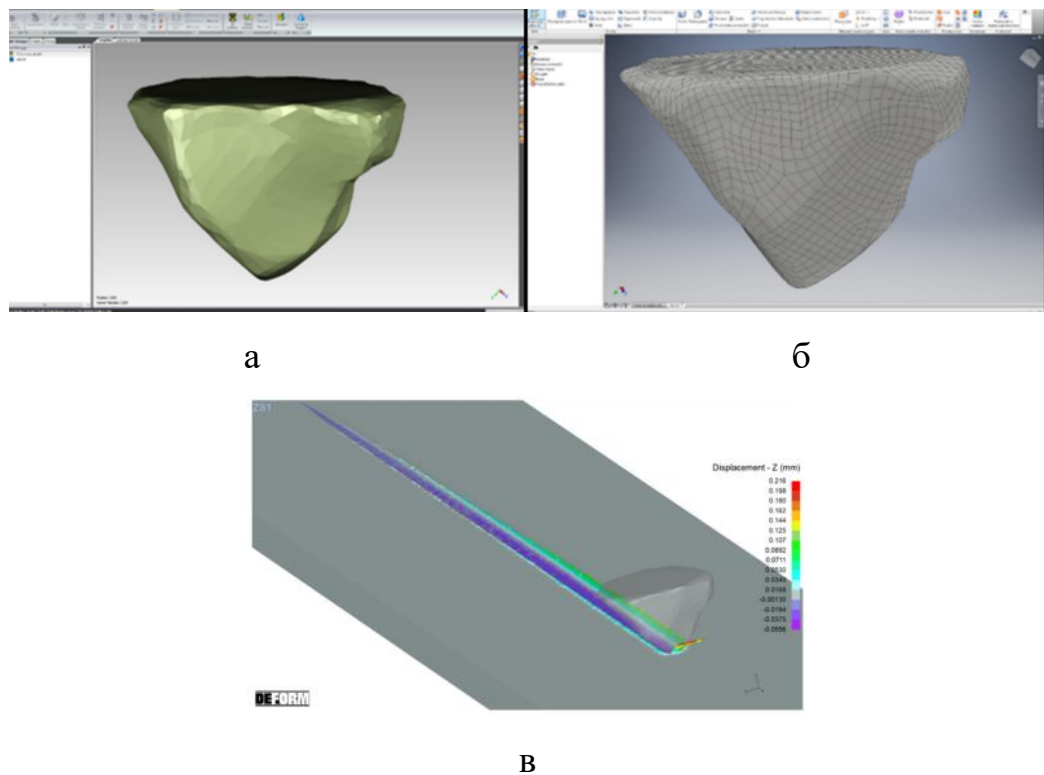


Рисунок 1.6.5 – Результат 3D-сканирования зерна абразива (геометрическая модель) (а), его конечно-элементное представление (б) и результат компьютерной симуляции процесса резания одиночным зерном в программе DEFORM 3D(в) [178]

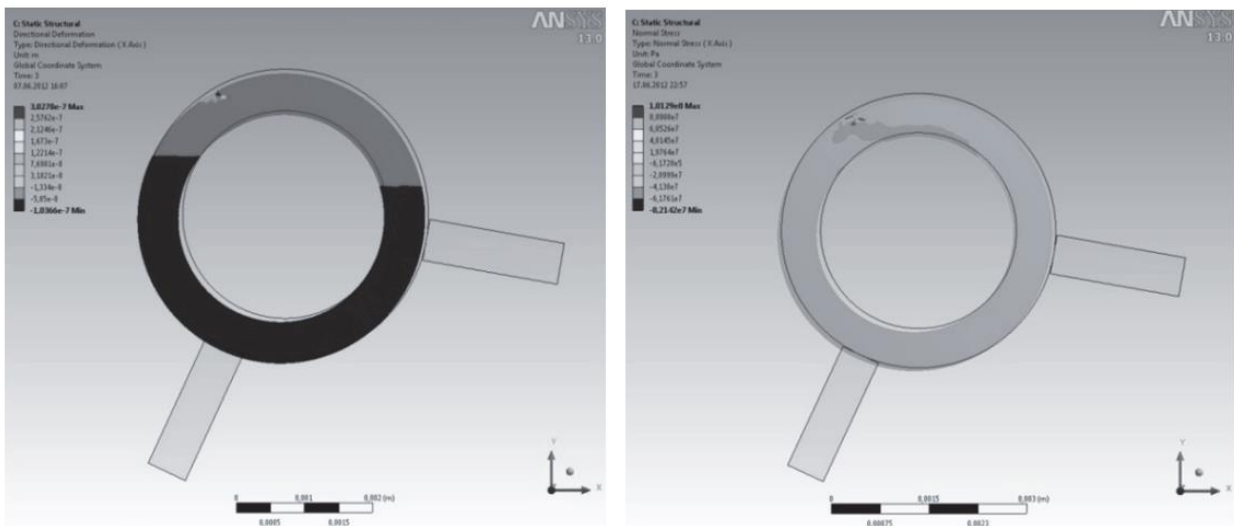
Особенность работы заключается в том, что разработку математических моделей а.з. выполняли триангуляционным сканированием реальной геометрии абразивов из зерен 97А размером F20. Затем, геометрические модели преобразовывали в расчетные (рис. 1.6.5). В результате выполненных исследований была

установлена оптимальная конфигурация зерен абразива путем проведения теста на образование царапин при снятии с титановых образцов стружки.

Следует отметить, что по полученным результатам профилей царапин авторам удалось провести реконструкцию возникающих сил резания, поскольку аналогичный анализ воздействия одиночного зерна на поверхность был продемонстрирован в схожей расчетно-экспериментальной работе [177] с учетом нормальных и тангенциальных сил резания, ввиду чего представленная методика будет крайне полезна при изучении силовых процессов шлифования.

Сравнительно иной подход силового моделирования при профильном шлифовании приведен в работе [78].

Контакт шлифовального круга с обрабатываемой заготовкой внутреннего кольца подшипника качения имитировался действием возникающих сил резания на профильную дорожку. Реализация выполнения данной задачи осуществлялась в программном пакете ANSYS Workbench (рис. 1.6.6), численное решение которой позволило оптимизировать применяемые режимы резания по отношению к формируемым остаточным напряжениям сжатия в обрабатываемой заготовке.



а

б

Рисунок 1.6.6 – Результат моделирования чернового режима шлифования внутреннего кольца подшипника в ANSYS Workbench при угле между опорой и горизонтальной осью кольца  $\alpha = 10^\circ$ : изолинии радиальных перемещений (а) и остаточных напряжений (б) [179]

В работе [80] процедура круглого шлифования рассматривается как вероятностно-статистический процесс, определяемый стохастическим количеством активных зерен при осуществлении механической обработки. По мнению авторов, разработка вероятностных компьютерных моделей абразивных инструментов на основе экспериментальных статистических данных позволяет сформировать истинное представление о силовом воздействии режущих а.з. с заготовкой.

Таким образом, учитывая все вышеперечисленное, можно сформулировать следующие выводы. Во-первых, контроль силового воздействия (в особенности сил резания) со стороны режущего абразивного инструмента (единичного зерна) по отношению к обрабатываемой заготовке является основным критерием при виртуализации процессов шлифования с позиции механики контактного взаимодействия, что позволяет решить подавляющее количество задач в области шлифования. Во-вторых, комплексный подход к рассмотрению и решению задач в этой области невозможен без применения технологии цифрового компьютерного моделирования, базирующегося в основном на методе конечных элементов, ввиду повышенной вычислительной сложности, учета большого количества всевозможных факторов и стохастичности описываемых процессов. И, в-третьих, применение постоянно совершенствующегося программного обеспечения для реализации интегрированных методов шлифования в дальнейшем предоставит возможность в значительной степени упростить решение задач по оптимизации режимов резания, периода стойкости абразивных инструментов, получению микро- и макропараметров поверхностей обработанных заготовок и других динамично расширяющихся в этом направлении вопросов.

### **1.7. Основные выводы**

В результате анализа научно-технической и патентной литературы сформулированы следующие выводы:

1. При шлифовании заготовок из цементируемых сталей с высокой степенью концентрации углерода в пределах толщины цементируемого слоя наблю-

дается повышенная абразивная износостойкость шлифуемого поверхностного слоя, что несколько затрудняет их обрабатываемость по сравнению с обрабатываемостью заготовок из нецементированных высокоуглеродистых сталей той же твердости и зачастую приводит к образованию дефектов.

2. В процессе исследований структуры цементируемых сталей отмечается «эффект самозакалки», возникающий при шлифовании и связанный с превращением большей части метастабильного аустенита в мартенсит при деформационном воздействии абразивных зерен. В результате этого повышается абразивная износостойкость шлифованных поверхностей изготавливаемых деталей.
3. Процесс механической обработки шлифованием заготовок из цементированных сталей изучен недостаточно глубоко. Особенно малоизученными являются процесс шлифования данных материалов высокопористыми кругами, использование которых дает хорошие результаты при изготовлении деталей из высоколегированных жаростойких сталей и сплавов. Недостаточно исследованными остаются особенности фазовых превращений и структурных изменений обрабатываемого металла в приповерхностном слое, связанные с формированием аустенитных и мартенситных частиц в кристаллической решетке цементированной стали.
4. В процессе абразивной обработки цементированных и закаленных сталей в поверхностном слое детали увеличивается (до 40-60%) содержание остаточного аустенита. Чем выше данный показатель, тем ниже качество обработанной поверхности по критериям микротвердости и износостойкости.
5. Связь между геометрическими параметрами, описывающими структуру абразивного инструмента, и силовыми, температурными факторами процесса обработки рассматривается многими исследователями. Однако в их работах результаты исследований представлены, в основном, в виде эмпирических зависимостей. Используемые зависимости содержат достаточно много коэффициентов из экспериментов, что су-

щественно усложняет и снижает достоверность инженерных расчетов, моделирующих процесс шлифования.

6. Форма абразивных зёрен, используемых для изготовления шлифовальных инструментов, изменяется в широком диапазоне. Абразивные зерна являются многогранниками неправильной формы. Чаще всего их представляют в виде сферы, пластинки, иглы, куба или призмы. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на эксплуатационные показатели кругов и эффективность процесса шлифования.
7. Существует необходимость создания единой математической модели, описывающей всю номенклатуру форм абразивных зерен, которые используются для изготовления шлифовальных кругов. Форма абразивного зерна оказывает влияние на прочностные, режущие, а следовательно, и на эксплуатационные характеристики шлифовальных инструментов. Важной задачей является количественное описание структуры шлифовального круга путем использования единой математической модели, описывающей всю номенклатуру форм абразивных зерен.
8. В рассмотренных экспериментах многочисленных исследователей имеет место однонаправленное ориентирование абразивных зерен, положение которых определяется положением их центров масс. Необходима разработка методики определения геометрии а.з., позволяющей оценивать ее параметры для различных положений зерен в пространстве, с учетом возможностей компьютерного моделирования и автоматизации данного процесса.
9. Большинство исследователей описывают геометрию режущей кромки абразивного зерна с помощью параметров  $\rho$  - радиус закругления режущей кромки и  $\varepsilon$  - угол при вершине режущей кромки. При этом отсутствует учет их переменности по высоте режущей кромки при выборе значений данных параметров.
10. Экспериментальные методы многочисленных исследователей позволяют оценить количество зерен в структуре шлифовального круга с достаточно большой погрешностью. Теоретически количество зерен определяется, либо

через структуру абразивного инструмента, либо через штучную плотность абразивного материала без экспериментального подтверждения. Существует необходимость в оценке данной характеристики.

11. В ряде работ авторы обоснованно утверждают, что количество режущих кромок на единице площади поверхности круга и закон их распределения по высоте профиля, а также геометрия режущих кромок оказывают влияние на теплосиловую напряженность процесса шлифования. При этом закон распределения абразивных зерен, по мнению авторов, носит случайный вероятностный характер. В связи с этим необходимо, используя предложенную единую модель а.з. и параметры, описывающие его геометрию, разработать принцип распределения касательных напряжений сдвига по высоте а.з. и определить математическую зависимость для расчета силы резания, действующей на рабочую поверхность круга при шлифовании.

12. В настоящее время широко используются численные методы цифрового моделирования шлифования в специальных программных пакетах. При этом, основные акценты делаются на изучении силовых процессов в зоне контакта а.з. с обрабатываемым материалом без учета прочностных ограничивающих факторов структуры круга и особенностей шлифования заготовок разной шлифуемости (например – цементируемых сталей). Построение цифровой модели позволяет снизить затраты на реальное исследование процесса, с заменой натурального эксперимента виртуальной аналогией.

На основании анализа литературных источников определены цель и задачи диссертационного исследования:

***Целью работы является повышение производительности шлифования цементированных заготовок при сохранении заданных характеристик качества готовых деталей путем учета и регулирования геометрических параметров рабочей поверхности абразивных зерен шлифовальных кругов и режимов выполнения шлифовальной операции.***

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выявить особенности шлифования заготовок из цементированных сталей кругами разных характеристик;
- смоделировать рабочую поверхность и внутреннюю структуру наиболее эффективного для шлифования цементированных заготовок абразивного круга;
- разработать математическую модель, описывающую основную номенклатуру форм абразивных зерен (а.з), используемых при изготовлении шлифовальных кругов и позволяющую осуществлять рациональный выбор их характеристик для шлифования цементированных заготовок;
- оценить взаимосвязь основных показателей качества и эксплуатационных характеристик шлифованных деталей из цементируемых сталей с условиями процесса их формообразования;
- исследовать эффективность процесса шлифования цементированных заготовок и качества поверхностей деталей при использовании высокоэффективных характеристик АК и режимов шлифовальной операции, выбранных с учетом разработанных в диссертационной работе методик;
- рассчитать ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов исследования в действующее производство.

## 2. Моделирование рабочей поверхности шлифовального круга

### 2.1. Математическая модель режущей кромки абразивного зерна

На первом этапе разработки теоретической части диссертационного исследования для корректного моделирования абразивной режущей поверхности абразивного зерна (а.з.) целесообразно определиться с ее основным элементом. В теории шлифования общепринято, что режущими элементами рабочей поверхности абразивного инструмента являются режущие кромки а.з. [54]. В контакт с обрабатываемой поверхностью вступает лишь 0,1 высоты поверхностного слоя, что составляет практически 5 % от средне вероятного размера а.з. [81]. Вместе с тем, размеры режущих кромок определяют, исходя из формы и размеров абразивного зерна. Для абразивных кругов средних характеристик в контакт с обрабатываемой поверхностью заготовки вступают не более 10-12 % а.з., находящихся на их рабочей поверхности (РП) и участвующих в процессе шлифования [54].

Изучение моделирования единичной режущей кромки, проводимое исследователями процесса шлифования, показывает, что в большинстве работ за основные геометрические характеристики абразивной режущей кромки (рис. 2.1.1) приняты  $\rho$  – радиус закругления режущей кромки и  $\varepsilon$  – угол при вершине режущей кромки, характеризующие плоскую модель резания при шлифовании металлов.



Рис. 2.1.1 – Традиционная модель режущей кромки а.з. по Маслову Е.Н., Лурье Г.Б. и Рыбакову В.А.

В теории шлифования следует считать устоявшейся объемную модель зерна без какой-либо площадки износа, хотя изношенная поверхность образуется на единичной режущей кромке при первом контакте ее с обрабатываемым материалом. Подобное описание процесса резания единичным абразивным зерном является крайне упрощенным, идеализированным и далеким от действительности.

В ходе диссертационного исследования проведены фотографирование и обработка более 1500 а.з. из электрокорунда 24А, 92А и карбида кремния 53С и 63С. По полученным изображениям а.з. были определены параметры геометрии единичной режущей кромки  $\rho$  и  $\varepsilon$ . Недостатками описания а.з. данными характеристиками следует считать: однонаправленное ориентирование а.з., конфигурация которых определяется положением их центров масс; параметры  $\rho$  и  $\varepsilon$  являются переменными по высоте режущей кромки, что не учитывается при выборе значений данных параметров, принятых для расчета силовых и температурных характеристик процесса шлифования; реальное а.з. заглубляется в обрабатываемый материал не более чем на 5% от номинального диаметра, и выбор значений  $\rho$  и  $\varepsilon$ , принятых для целых размеров а.з., следует признать не обоснованным.

На первом этапе теоретической части диссертационного исследования для корректного моделирования структуры шлифовального круга целесообразно определить с ее основным элементом. «Режущая кромка а.з.» — это объемный сегмент рабочей части зерна, непосредственно контактирующей с обрабатываемым материалом. Высота данного сегмента равна глубине внедрения режущей кромки в заготовку  $y_{вн}$  (рис. 2.1.2).

Поскольку шлифование является процессом контактного взаимодействия заготовки и инструмента предпочтительно использовать в модели режущей кромки а.з. параметры, характеризующие специфику данного физического процесса. Поскольку в качестве интегральной характеристики РП абразивного инструмента выбрана относительная опорная поверхность [29], предлагается форму режущей кромки моделировать с помощью аналогичной функции. А.А. Сагарда и И.Х. Че-

повецкий в своих работах по контактной жесткости [82, 83] использовали при описании шероховатой поверхности параметры  $b$  и  $\nu$ , где  $\nu$  – коэффициент, определяющий форму единичной неровности,  $b$  – коэффициент, учитывающий ее наполненность. В связи с этим, используя результаты исследований сотрудников данной научной школы, в основу предлагаемой нами математической модели режущей кромки абразивного зерна положим параметры  $b_p$  и  $\nu_p$ .

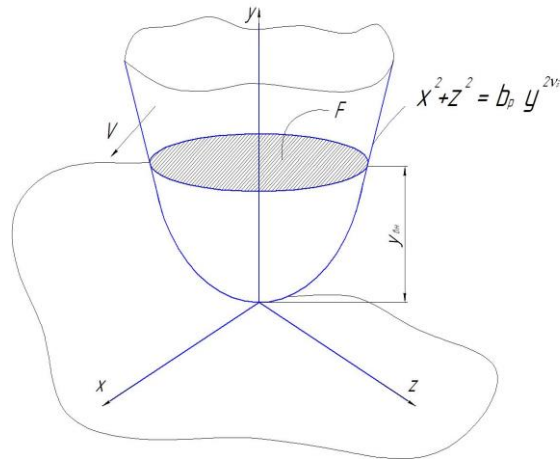


Рис. 2.1.2 – Режущая кромка а.з. в виде поверхности вращения второго порядка

В диссертационном исследовании с помощью САД систем произведем моделирование режущей кромки а.з. объемной фигурой второго порядка (рис. 2.1.2) с образующей, которая описывается математической зависимостью [86]:

$$x^2 + z^2 = b_p y^{2\nu_p} \quad (2.1.1)$$

Ось  $x$  направим в сторону вектора скорости резания, ось  $y$  – к нормально обрабатываемой поверхности, ось  $z$  – перпендикулярно этим осям, начало координат « $o$ » поместим в вершину режущей кромки а.з. Рассмотрим работу режущей кромки а.з. в процессе шлифования (например – заготовок из цементируемых сталей) с постоянной окружной скоростью  $V$  и глубиной его внедрения в обрабатываемую поверхность  $y_{вн}$ . В теории резания следует считать устоявшейся объемную модель зерна (сфера, пирамида, конус, эллипс, цилиндр и др. [21, 68, 83-85]), а, следовательно, необходимо учитывать распределение составляющих силы шлифования не по некоторой приближенной плоскости, а по передней части боковой поверхности режущей кромки а.з. Параметр  $b_p$  характеризует быстроту нарастания профиля сечения режущей кромки в зависимости от глубины ее внедрения в

обрабатываемый материал, а параметр  $\nu_p$  – форму образующей ( $\nu_p < 1$  – кромка выпуклая,  $\nu_p = 1$  – кромка конусообразная,  $\nu_p > 1$  – кромка воронкообразная). Ось  $u$  направлена от вершины вглубь зерна. Ось симметрии образующей кромки нормальна к обрабатываемой поверхности.

Принятая модель режущей кромки позволяет математически объединить при моделировании множество геометрических фигур: цилиндр ( $\nu_p = 0$ ), стержень ( $\nu_p \rightarrow 0$ ), сфера ( $\nu_p = 0,264$ ), конус ( $\nu_p = 1$ ), параболоиды ( $\nu_p < 1$ ) и гиперboloиды ( $\nu_p > 1$ ), которые использовались для моделирования абразивных зерен шлифовальных кругов разными исследователями.

В процессе шлифования абразивное зерно заглубляется на определённую глубину в обрабатываемый материал. Параметр  $y_{вн}$  характеризует высоту части единичной режущей кромки, которая внедряется в заготовку и осуществляет процесс микроцарапания.

Значение глубины внедрения зерна в обрабатываемый материал [86]:

$$y_{вн} = S_p \cdot \frac{n_{заг}}{n_{кр}}, \quad (2.1.2)$$

где  $S_p$  – врезная подача шлифовального круга на оборот заготовки, мм/об;

$n_{заг}$  – число оборотов шпинделя заготовки в минуту, об/мин;

$n_{кр}$  – число оборотов шпинделя круга в минуту, об/мин.

В работе [87] используется подобная модель, однако авторы считают, что вся поверхность режущей кромки, контактирующей с материалом, осуществляет только микрорезание. Использование кривых второго порядка для моделирования режущей кромки а.з. на рабочей поверхности шлифовального круга (РП ШК) дается в работе [88]. Авторы моделируют микропрофиль РП ШК и обработанной поверхности, но без учета разделения неровностей поверхности инструмента на режущие кромки и связку.

## 2.2. Модель абразивного зерна

Шлифование является весьма сложным процессом финишной механической обработки, имеющим свои специфические особенности, которыми он отличается от процессов резания металлов инструментом с правильной геометрией. Отличие предопределяется сложностью рельефа рабочей поверхности абразивных кругов. Существенное влияние на процесс шлифования оказывает форма а.з.

В результате анализа состояния вопроса исследования формы а.з, используемых для изготовления шлифовальных инструментов [44-47,180], установлено, что она изменяется в широком диапазоне разновидностей, и это обстоятельство оказывает значительное влияние на эксплуатационные показатели кругов и эффективность процесса шлифования. Большинство исследователей описывают геометрию абразивного зерна посредством изучения однонаправленного ориентирования их в пространстве, положение которых определяется их центром масс, так как зерна исследовались без закрепления их в связке. Разработано большое количество методов по определению параметров геометрии абразива, но в настоящее время отсутствуют исчерпывающие исследования формы зерен шлифовального инструмента, которое бы позволило описать математическими зависимостями и смоделировать с помощью САД-САЕ систем большинство возможных их геометрических разновидностей. Проанализированные методики оценки размерных параметров и характеристик формы абразивных зерен имеют существенную погрешность измерения и применимы только для определения отдельных параметров геометрии зерна, а не изучения их в комплексе.

Для более глубокого анализа разновидностей форм а.з., используемых для изготовления шлифовального инструмента произведено фотографирование более 1500 образцов из нормального 14А и хромотитанистого легированного электрокорунда 92 А, а также карбидов кремния 53С, 63С. Исследовался абразив 16, 20, 25, 32, 40, 50 и 80 зернистости. Фотографии получены с помощью экспериментальной установки на основе тринокулярного микроскопа Микромед-2 в комплекте с цифровым фотоаппаратом Canon PowerShot A650 (рис. 2.2.1)



Рис. 2.2.1 – Общий вид экспериментальной установки на основе микроскопа Микромед-2

Анализ фотографий зерен различных абразивных материалов и номеров зернистости (рис 2.2.2) подтвердили вывод о неоднородности формы зерен и о невозможности приближения ее к объемным фигурам правильной геометрической формы.

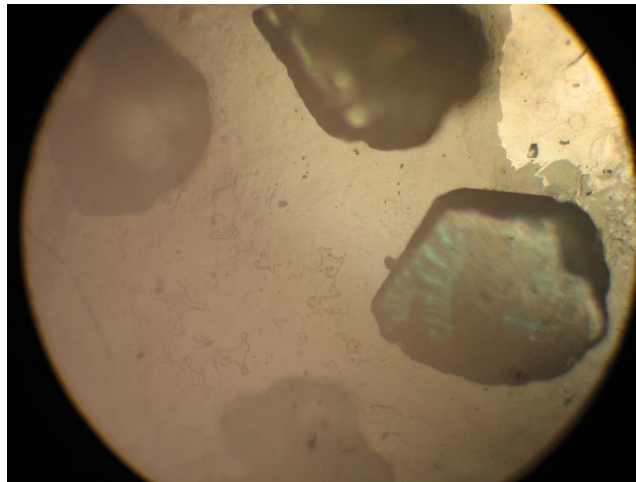


Рис. 2.2.2 – Фотографии абразивных зерен

При исследовании фотографий абразивных зерен выявлено, что их абсолютное большинство можно математически описать элементами поверхности второго порядка (2.2.1), которые симметрично отражаются относительно плоскости, проходящей через его центр масс  $C_{ц.м.}$ , расположенный на расстоянии  $u_{ц.м.}$  от вершины зерна (рис. 2.2.3).

$$x^2 + z^2 = b_p y^{2\nu_p} \quad (2.2.1)$$

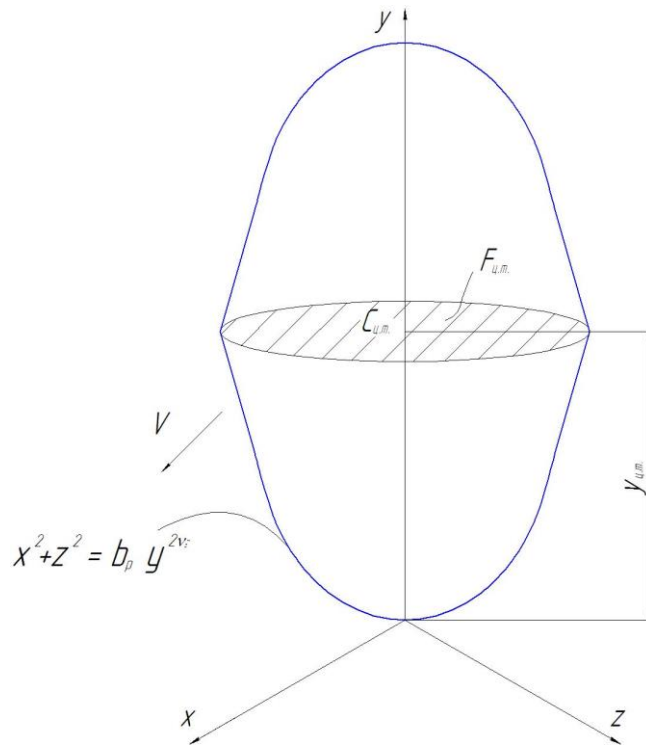


Рис. 2.2.3 – Общая модель а.з. в виде объемной фигуры второго порядка

Радиус  $R_{ц.м.}$  сечения а.з. горизонтальной плоскостью, проходящей через центр тяжести  $C_{ц.м.}$  данной пространственной фигуры второго порядка, определен решением системы уравнений:

$$\begin{cases} y = C_{ц.м.} \\ x^2 + z^2 = b_p y^{2\nu_p} \\ x^2 + z^2 = r^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y = C_{ц.м.} \\ \frac{x^2 + z^2}{b_p} = y^{2\nu_p} \\ x^2 + z^2 = r^2 \end{cases} \Rightarrow \frac{R_{ц.м.}^2}{b_p} = C_{ц.м.}^{2\nu_p} \Rightarrow R_{ц.м.} = C_{ц.м.}^{2\nu_p} \sqrt{b_p} \quad (2.2.2)$$

Объем а.з., описанный в виде данной поверхности второго порядка, рассчитывается:

$$\begin{aligned} V_{зеп} &= \iiint_V dV = \iiint_V dy \cdot dx \cdot dz = \int_{2\nu_p \sqrt{\frac{x^2+z^2}{b_p}}}^{C_{ц.м.}} dy \left( \iint_S dx dz \right) = \\ &= \pi \left( b_p \cdot C_{ц.м.}^{(2\nu_p+1)} - \frac{b_p \cdot C_{ц.м.}^{(2\nu_p+1)}}{\left( \frac{1}{2\nu_p} + 1 \right)} \right) = \pi b_p C_{ц.м.}^{(2\nu_p+1)} \left( 1 - \frac{2\nu_p}{2\nu_p + 1} \right) \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

Окончательно объем а.з., модель которого представлена в виде элемента поверхности второго порядка, получаем равным:

$$V_{зep} = \pi b_p C_{ц.м.}^{(2\nu_p+1)} \left( \frac{1}{2\nu_p+1} \right) \quad (2.2.4)$$

Если использовать при моделировании а.з. общую форму поверхности второго порядка и в качестве его профиля образующую, описанную математической зависимостью (2.2.1.), то появляется возможность применить для описания абразивного материала в структуре шлифовального круга частные случаи объемных фигур второго порядка (параболоид вращения  $\nu_p=0,5$ ; конус  $\nu_p=1$ ; цилиндр  $\nu_p=0$ ; сфера  $\nu_p=0,264$ ).

В процессе диссертационного исследования определены математические зависимости для определения объемов данных пространственных тел, которыми моделируется профиль а.з. Для этого подставим конкретные значения величин коэффициента профиля  $\nu_p$  в выражение (2.2.4). Результаты, полученные в процессе расчетов и математических преобразований зависимостей (2.2.1) и (2.2.4) сведем в таблицу 2.2.1.

Величина  $C_{ц.м.}$  – это расстояние от центра тяжести зерна до самой выступающей его вершины.

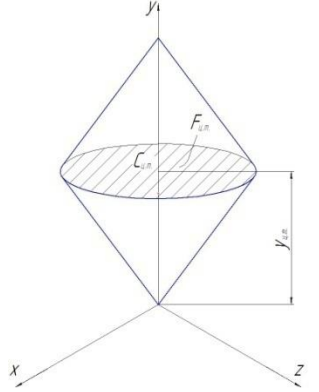
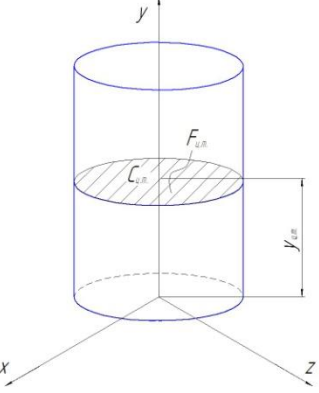
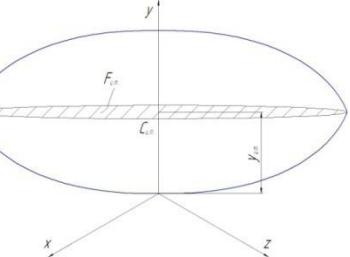
Зерна в процессе изготовления шлифовальных кругов до начала прессования располагаются хаотически. Под воздействием давления они распределяются по объему, подчиняясь закону равномерного распределения. Зерно, которое обволакивает связка до термообработки, используя публикации Носова Н.В. [75], назовем гранулой, которая представляет собой сферу диаметром  $d_0$ . По Маслову Е.Н. [47], этот параметр определяется:

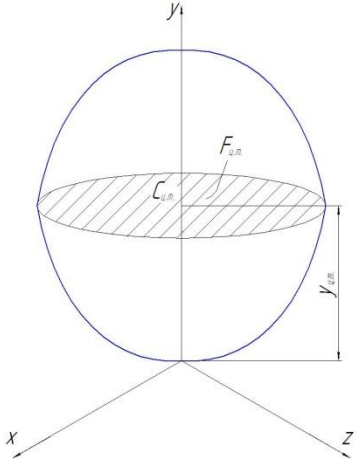
$$d_0 = 10,6 \cdot N_{зep} \text{ , мкм} \quad (2.2.11.)$$

где  $d_0$  – диаметр, описанной около а.з. окружности;

$N_{зep}$  – номер зернистости шлифовального круга.

Таблица 2.2.1 – Результаты моделирования а.з. шлифовального круга  
объемными фигурами второго порядка

№ п/п	Наименование фигуры второго порядка	Величина $\nu_p$	Математическая зависимость, моделирующая образующую а.з.	Объем зерна	Модель абразивного зерна
1.	Конус	$\nu_p=1$	$x^2 + z^2 = b_p y^2$ (2.2.5.)	$V_{зер} = \frac{\pi b_p C_{ц.м}^3}{3}$ (2.2.6.)	 <p>Рис.2.2.4. Модель абразивного зерна в виде конуса</p>
2.	Цилиндр	$\nu_p=0$	$x^2 + z^2 = b_p$ (2.2.7.)	$V_{зер} = \pi \cdot b_p \cdot C_{ц.м}$ (2.2.8.)	 <p>Рис.2.2.5. Модель абразивного зерна в виде цилиндра</p>
3.	Параболоид	$\nu_p=0,5$	$x^2 + z^2 = b_p y$ (2.2.9.)	$V_{зер} = \frac{\pi b_p C_{ц.м}^2}{2}$ (2.2.10.)	 <p>Рис.2.2.6. Модель абразивного зерна в виде параболоида</p>

4.	Сфера	$\nu_p=0,264$	$x^2 + z^2 = b_p y^{0,528}$ <p style="text-align: center;">(2.2.11.)</p>	$V_{\text{зер}} = \frac{\pi b_p C_{\text{ц.м}}^{1,528}}{1,528}$ <p style="text-align: center;">(2.2.12.)</p>	 <p style="text-align: center;">Рис.2.2.7. Модель абразивного зерна в виде сферы</p>
----	-------	---------------	--	--	---

В рамках диссертационного исследования проведено моделирование абразивного зерна шлифовального инструмента правильными фигурами второго порядка. Определены их объемы, которые зависят от трех основных геометрических характеристик абразивного зерна:  $b_p$ ,  $\nu_p$  и  $N_{\text{зер}}$ .

Полученные результаты позволяют перейти к моделированию внутренней структуры шлифовального круга.

### 2.3. Моделирование структуры абразивного инструмента различными типами кристаллических решеток

Опубликовано значительное количество работ [66, 74, 75, 89], в которых исследователи моделировали внутреннюю структуру абразивного инструмента, но, несмотря на это, выбор схемы распределения абразивных зерен в объеме круга, является сложной задачей.

Исходя из этого, определим область использования различных пространственных решеток при формировании внутренней структуры абразивного инструмента. Для этого рассмотрим три вида кристаллических решеток, в узлах которых расположены гранулы: а) прямоугольная кубическая решетка; б) решетка в

виде параллелепипеда; в) решетка из прямых правильных трехгранных призм или тетраэдров.

Для анализа выделим единичные элементы кристаллических решеток; выведем математические зависимости параметров внутренней структуры абразивного инструмента от характеристик круга.

В теории шлифования принято заменять реальную форму зерна эквивалентной формой, поддающейся математическому описанию. Общеизвестным допущением в теории шлифования является, что гранула (зерно, которое обволакивается связкой) имеет одинаковый усредненный объем, равный объёму сферы [66], тогда его величина, в которой равновероятно может расположиться зерно определяется:

$$V_{\text{зер.ср}} = \frac{\pi \cdot d_0^3}{6}, \quad (2.3.1)$$

где  $d_0$  – диаметр, описанной около а.з. окружности, мм.

$$d_0 = 10,6 \cdot N_{\text{зер}}, \text{ мкм} \quad (2.3.2)$$

Структура абразивного инструмента характеризуется содержанием абразивного материала в единице его объема, выраженным в процентах.

$$100\% = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.3.3)$$

$C_1$  – процентное содержание зерен;

$C_2$  – процентное содержание связки;

$C_3$  – процентное содержание пор.

Зерна до начала прессования располагаются хаотически. Под воздействием давления они начинают распределяться по объему, подчиняясь закону равномерного распределения (для проведения расчетов примем, что расстояние между центрами тяжести зерен в структуре одинаково).

Зерно, которое обволакивает связка, назовем гранулой:

$$d_{\Gamma} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} d_0 \quad (2.3.4)$$

При моделировании будем понимать, что соседние гранулы контактируют друг с другом, тем самым достигается самая плотная упаковка. Расстояние между центрами тяжести зерен изменяется в следующих пределах:

$$a \in \left[ d_0; \frac{C_1 + C_2}{C_1} d_0 \right]$$

Минимальное расстояние  $d_0$  достигается, когда непосредственно сами зерна соприкасаются. Путем введения в плотную упаковку связки расстояние между а.з. увеличивается до максимального. Таким образом, можно получить более разреженную внутреннюю структуру кристаллических решеток, в узлах которых располагаются а.з.

По результатам обобщения научных работ [66, 74, 75, 89] для анализа были отобраны следующие варианты кристаллических решеток: прямоугольная кубическая решетка; решетка, состоящая из прямых правильных трехгранных призм с основанием в виде равностороннего треугольника, с наклонными трехгранными призмами, которые образованы комбинацией из октаэдров (правильных восьмигранников) и тетраэдров (правильных четырехгранников).

Из объема инструмента были выделены единичные элементы правильной формы – куб, параллелепипед и тетраэдр.

Самым распространенным принципом равномерного распределения зерен по объему абразивного инструмента является расположение их в вершинах кубической решетки. За элементарную единицу можно принять куб, имеющий размер  $4 \times 4$  зерна (рис. 2.3.1).

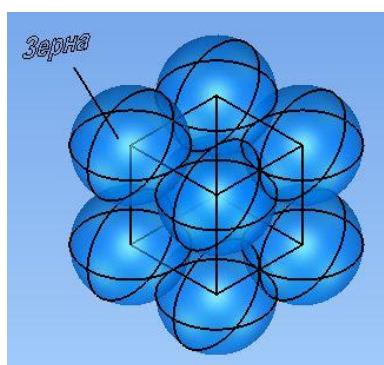


Рис. 2.3.1 – Элементарная единица кубической решетки

Каждое зерно в единичном элементе принадлежит одновременно 8 аналогичным элементарным единицам. От каждого зерна  $1/8$  часть объема принадлежит единичной структуре, поскольку всего таких зерен в единичном элементе 8, то на каждое зерно приходится объем:

$$V_{\text{зер-куб}} = \frac{1}{8} V_{\text{куб}} \cdot 8 = V_{\text{куб}} \quad (2.3.5)$$

В таком случае количество элементарных единиц в структуре круга совпадает с количеством зерен.

Объем зерна можно вычислить, если знать процентное содержание абразивных зерен в круге:

$$V_{\text{зер}} = C_1 \cdot V_{\text{стр.ед}} \quad (2.3.6)$$

Объем элементарной кубической единицы равен:

$$V_{\text{стр.ед}} = a^3, \quad (2.3.7)$$

где  $a$  – кратчайшее расстояние между центрами масс зерен, мм.

Подставляя объем элементарной единицы в формулу (2.3.6), получаем:

$$V_{\text{зер}} = C_1 \cdot a^3 = \frac{\pi \cdot d_0^3}{6} \quad (2.3.8)$$

Из этой зависимости можно выразить параметр  $a$ :

$$a = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6C_1} d_0^3} \quad (2.3.9)$$

Накладывая ограничения, исходя из того, что расстояние между центрами масс зерен не может быть меньше их диаметра:

$$\frac{a}{d_0} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6C_1}} \geq 1, \quad ,$$

получаем

$$C_1 \leq \frac{\pi}{6} \text{ или } C_1 \leq 0,52 \quad (2.3.10)$$

Из математических расчетов становится очевидным, что кубическая решетка в шлифовальном круге может существовать только при содержании зерен менее или равным 52% (с 16 по 5 номера структур).

В момент прессования шлифовального круга оказывается давление на материал, что приводит к смещению центра масс зерен относительно их первоначального положения. Это вызывает искажение первоначальной решетки. Чем выше

давление, тем большее количество а.з. стремится создать более плотную упаковку.

Если круг имеет номер структуры выше пятой, то под воздействием давления кубическая решетка начинает деформироваться на некоторый угол. В таком случае за элементарную единицу можно принять параллелепипед, имеющий размер  $4 \times 4$  зерен, стороны которого находятся под наклоном. Угол между сторонами обозначим  $\alpha$  (рис. 2.3.2).

Принцип определения объема зерен, принадлежащих элементарной ячейке, аналогичен кубической решетке.

Объем структурной единицы равен:

$$V_{\text{стр.ед}} = a^3 \cdot \sin \alpha \quad (2.3.11)$$

Проводим далее аналогичные преобразования:

$$V_{\text{зер}} = C_1 \cdot a^3 \cdot \sin \alpha = \frac{\pi \cdot d_0^3}{6} \quad (2.3.12)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6C_1 \cdot \sin \alpha}} \cdot d_0 \quad (2.3.13)$$

$$\frac{a}{d_0} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6C_1 \cdot \sin \alpha}} \geq 1$$

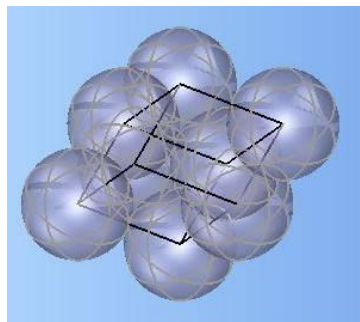


Рис. 2.3.2 – Элементарная единица кристаллической решетки в виде параллелепипеда

$$\frac{\pi}{6C_1 \cdot \sin \alpha} \geq 1$$

$$C_1 \leq \frac{\pi}{6 \cdot \sin \alpha} \quad (2.3.14)$$

Для нахождения угла между сторонами из формулы выразим синус этого угла:

$$\sin \alpha = \frac{\pi}{6C_1} \quad (2.3.15)$$

Подставляя вместо  $C_1$  объем абразива в процентах, получим угол, на который смещаются стороны друг относительно друга при оказании на них давления.

Таблица 2.3.1 Зависимость угла деформации  $\alpha$  от процентного содержания абразивного материала

$C_1$	$\sin \alpha$	$\alpha$
0,54	0,9691	75° 42'
0,56	0,9345	69° 9'
0,58	0,9023	64° 27'
0,60	0,8727	60° 77'

Критерием существования кристаллической решетки с расположением абразивных зерен в вершинах параллелепипеда является:

$$0,54 \leq C_1 \leq 0,60 \quad (2.3.16)$$

Можно утверждать, что с увеличением содержания зерен с 54% до 60% угол  $\alpha$  между сторонами уменьшается с 90° до 60°. Из расчетов видно, что кубическая структура постепенно деформируется в ромбическую, так как угол между сторонами в 60° соответствует структурной единице в виде ромба.

Из расчетов следует, что для круга с номером структуры равной единице зерна расположены в элементарной ячейке, представляющей собой ромб.

Кубическая и ромбическая структуры являются частными случаями параллелепипеда.

Нерассмотренной является нулевая структура круга. Вероятнее всего, ей соответствует самое плотное размещение зерен относительно друг друга. В настоящее время такой упаковкой считается, когда зерна расположены в вершинах тетраэдра, однако весь объем заполнить такими единичными элементами не представляется возможным [74].

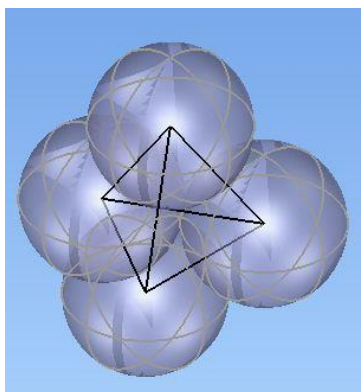


Рис. 2.3.3 – Элементарная единица в виде тетраэдра

Структура круга, образованная на базе комбинаций из тетраэдров, реализуется путем совмещения сторон равносторонней пирамиды.

Согласно [74] объем, занимаемый одним зерном при расположении в вершинах тетраэдра, равен:

$$V_{\text{тетр}} = 0,71 \cdot a^3 \quad (2.3.17)$$

Процентное содержание зерен находится следующим образом:

$$V_{\text{абр}} = C_1 \cdot 0,71 \cdot a^3 = \frac{\pi \cdot d_0^3}{6} \quad (2.3.18)$$

$$a = \sqrt{\frac{\pi}{4,26 \cdot C_1}} d_0 \quad (2.3.19)$$

$$\frac{a}{d_0} = \sqrt{\frac{\pi}{4,26 \cdot C_1}} \geq 1$$

$$\frac{\pi}{4,26 \cdot C_1} \geq 1$$

$$C_1 \leq \frac{\pi}{4,26} \text{ или } C_1 \leq 0,74 \quad (2.3.20)$$

Самое большое содержание абразивных зерен в круге составляет 62% при  $N_{\text{стр}} = 0$ . Исходя из расчетов, получается, что именно этой структуре соответствует самая плотная упаковка.

Полученные математические зависимости позволяют четко представить область существования рассмотренных элементарных структур в объеме круга. Следует подчеркнуть, что все ограничения справедливы для условия, когда расстоя-

ние между центрами тяжести зерен равно диаметру зерна, в этом случае связка отсутствует и поровое пространство минимально.

По полученным ограничениям (2.3.9), (2.3.16) и (2.3.20) можно выяснить область существования той или иной структурной решетки в объеме инструмента (табл. 2.3.2).

Таблица 2.3.2 – Область существования структурных решеток  
в объеме абразивного инструмента

C1	C3	H (M1)	I (M2)	J (M3)	K (CM1)	L (CM2)	M (C1)	N (C2)	O (CT1)	P (CT2)	Q (CT3)	R (T1)	S (T2)	T (BT1)	U (BT2)	V (CT1)	W (CT2)
		46,5	45	43,5	42	40,5	39	37,5	36	34,5	33	31,5	30	28,5	27	25,5	24
15	0,3	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
14	0,3 2	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
13	0,3 4	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
12	0,3 6	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
11	0,4 0	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
10	0,4 2	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
9	0,4 4	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
8	0,4 6	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
7	0,4 8	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
6	0,5 0	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
5	0,5 2	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п	кт рп	ктр п
4	0,5 4	-	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт
3	0,5 6	-	-	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт
2	0,5 8	-	-	-	-	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт	прт
1	0,6 0	-	-	-	-	-	рт	рт	рт	рт	рт	рт	рт	рт	рт	рт	рт
0	0,6 2	-	-	-	-	-	-	т	т	т	т	т	т	т	т	т	т

где к – кубическая решетка

р – ромбическая решетка

п – параллелепедальная решетка

т – тетраэдральная решетка

прочерк – сумма абразива и пор превышает 100%.

Из анализа области определения следует, что для нулевой структуры возможен единственный вариант расположения зерен в круге – в вершинах тетраэдра; для круга с номером структуры равной 1 зерна могут иметь как тетраэдральную решетку, так и ромбическую; при номере структуры с 4 по 2 зерна располагаются в вершинах параллелепипеда с соответствующими углами между его сторонами, также здесь могут существовать упаковки в виде ромба и тетраэдра; ко всем выше перечисленным упаковкам для кругов с номером структуры с 16 по 5 добавляется кубическая.

Более плотную внутреннюю структуру можно получить комбинацией двух взаимно смещенных кубических решеток с зёрнами разного размера.

Для расчета количества зерен в одном кубическом мм необходимо точно знать, какой объем занимает одно зерно:

$$n = \frac{1}{V_{\text{зер}}} \quad (2.3.21)$$

Из формул (2.3.5) и (2.3.17) видно, что объем одного зерна зависит от типа кристаллической решетки. Анализ таблицы 2.3.2 показал, что нельзя однозначно утверждать, какая именно решетка будет соответствовать определенной структуре круга. Следовательно, достоверно определить количество зерен данным методом не представляется возможным.

Поскольку технология размола слитков электрокорунда и карборунда, а также технология последующего отсева стандартизована, то в одном и том же объеме инструмента находится равное количество одноразмерных зерен. Выдвинутое предположение служит предпосылкой к тому, что в одинаковом объеме, независимо от вида материала, содержится одинаковое количество абразивных зерен. Таким образом, на наш взгляд, более правильно определять количество зерен из расчета в единице объема или в единице массы.

В диссертационном исследовании получены зависимости для определения расстояния «а» между центрами тяжести гранул для каждой из видов решеток. Полученные математические расчёты позволяют четко представить область существования рассмотренных элементарных структур в объеме круга.

## 2.4. Моделирование системы «зерно-связка» структуры шлифовального круга

Производительность процесса шлифования и износостойкость шлифовального круга во многом определяется прочностью удержания а.з. в связке, которая в свою очередь зависит от нескольких факторов: механических свойств и реакционной способности связки; коэффициента термического расширения последней и ее способности кристаллизоваться; от количества связки в абразивном инструменте [90-92]. Материал связки должен обладать высокими механическими свойствами, хорошей реакционной способностью, малой склонностью к кристаллообразованию (в зоне контакта связки с а.з.) и коэффициентом термического расширения, близким к коэффициенту расширения зерна [88].

Предположим, что имеется возможность управлять расположением зёрен в связке (примеры подобной технологии описаны Ящерицыным П.И. и А.Г. Зайцевым в работе [93]). На основании этого смоделируем шлифовальный круг, а.з. в структуре которого расположены равномерно, и расстояние между центрами тяжести соседних зёрен  $a$  одинаково. Определение значений  $a$  для различных внутренних структур шлифовального круга осуществлено с использованием зависимостей (2.3.9), 2.3.13), (2.3.19).

В исследовании рассмотрены два варианта структуры шлифовального круга, что обусловлено различием спекающихся и плавящихся керамических связок. Плавящиеся связки в ходе процессов, происходящих при спекании и обжиге инструмента, по всему объему превращаются в стеклообразную массу, образуя однородную структуру (рис.2.4.1, б). Связка частично растворяет поверхностный слой а.з., создавая жесткое неразъемное соединение.

Спекающиеся связки оплавляются в процессе термической обработки лишь частично, не взаимодействуя с а.з. и не вступая в диффузию с его поверхностным слоем. На спекающихся керамических связках структура абразивного инструмента – неоднородная и пористая (рис.2.4.1, а) [94].

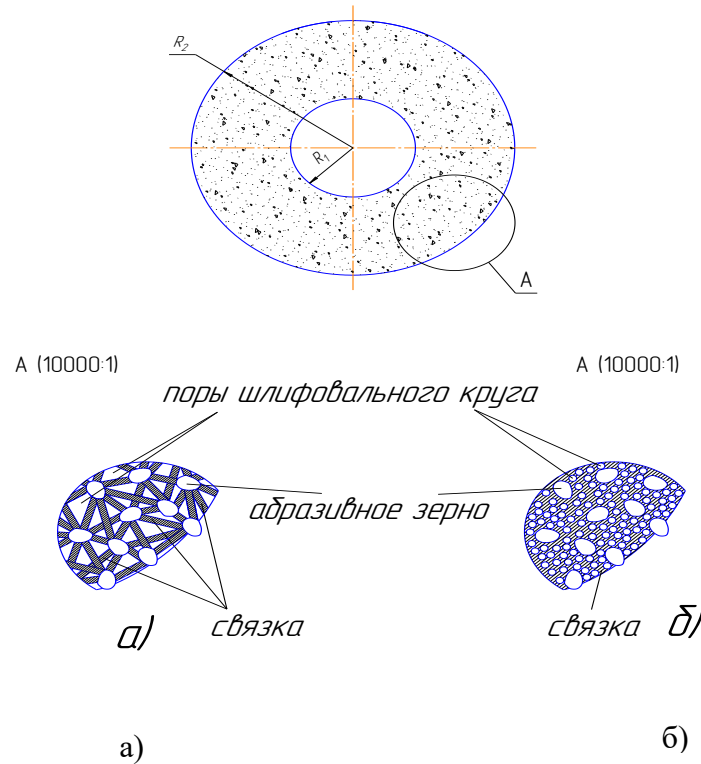


Рис.2.4.1 – Структура абразивного инструмента:  
 а) на спекающейся связке, б) на плавящейся связке

Моделирование структур шлифовального инструмента, основанных на двух видах связки, требует детального рассмотрения системы «зерно-связка» в каждой из них. Круг на плавящейся связке представляет собой монолитную структуру, в которой в определенной последовательности расположены абразивные зерна. Порообразующие вещества при спекании круга выгорают, образуя поры в структуре абразивного инструмента из-за возникающих паров газа. Двигаясь по пути наименьшего сопротивления из материала круга в окружающую среду, они образуют капиллярные каналы неправильной формы. Каналы формируют вокруг зерен элемент связки сложной формы. Абразивный инструмент на спекающейся связке имеет несколько другое строение. Связка, частично оплавляясь, образует вокруг а.з. обволакивающий элемент и несколько мостиков, удерживающих зерно в структуре круга. В связи с подобием структурного элемента в инструментах на спекающейся и плавящейся связках попытаемся построить общую модель структуры круга для различных видов керамической связки.

Математическое описание модели структуры шлифовального круга является сложной задачей. Расположение пор в абразивном инструменте носит случайный, вероятностный характер. Варьируя элементами режима технологии производства кругов, возможно управлять процессом распределения а.з. в его структуре.

Расстояние между центрами тяжести а.з. обозначим параметром  $a$ . Все абразивные элементы в структуре инструмента равномерно покрываются связкой. Закрепление их в круге обеспечивается за счет мостиков связки, имеющих разнообразную объемную конфигурацию. На рис.2.4.2 представлены наиболее распространенные формы мостиков связки.

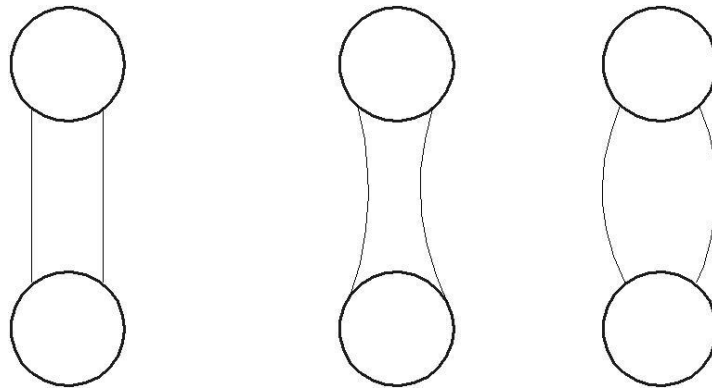


Рис. 2.4.2 – Виды мостиков связки

Исследуем вариант крепления а.з. в структуре шлифовального круга цилиндрическими мостиками связующего вещества.

Для построения математической модели структуры шлифовального инструмента необходимо определить количество а.з. в объеме круга, радиус мостика связки, расстояние между зернами, высоту связки, обволакивающей зерно.

Число а.з. в круге равно:

$$n_{\text{зер}} = \frac{V_{\text{абр}}}{V_{\text{зер}}}, \quad (2.4.1)$$

где  $V_{\text{зер}}$  – объем одного а.з., мм<sup>3</sup>,  $V_{\text{абр}}$  – объем всего абразивного материала в шлифовальном круге, мм<sup>3</sup>.

Объем абразивных зерен, содержащихся в круге, вычисляется по формуле:

$$V_{абр} = \frac{V_{кр} \cdot (60 - 2 \cdot (N_{стр} - 1))}{100}, \quad (2.4.2)$$

где  $N_{стр}$  – номер структуры абразивного инструмента,  $V_{кр}$  – объем круга, мм<sup>3</sup>.

В табл. 2.3.1 приведено процентное содержание абразива в шлифовальном инструменте.

Объем круга равен:

$$V_{кр} = \pi \cdot (R_{нар}^2 - R_{вн}^2) \cdot H_{кр}, \quad (2.4.3)$$

где  $R_{нар}$  – наружный радиус круга, мм;  $H_{кр}$  – высота инструмента, мм,  $R_{вн}$  – радиус его посадочного отверстия, мм.

Таблица 2.4.1 – Процентное содержание абразива в шлифовальном круге [95]

	Номер структуры круга															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$V_{абр},$ %	0,6	0,58	0,56	0,54	0,52	0,5	0,48	0,46	0,44	0,42	0,4	0,38	0,36	0,34	0,32	0,3

Объемы одного а.з. при различных вариантах его моделирования определены в зависимостях (2.2.4), (2.2.6) и (2.2.8), которые зависят от величины  $C_{ц.м}$ , расстояния от центра тяжести зерна до самой выступающей его вершины, которое эквивалентно параметру  $d_0$  – диаметру, описанной около а.з. окружности. Основной формой а.з. в диссертационном исследовании принят параболоид вращения, поэтому одного а.з. при моделировании внутренней структуры шлифовального круга будем определять по зависимости (2.2.4).

Таким образом, используя зависимости (2.2.4), (2.2.9), (2.4.1), (2.4.2) и (2.4.3), число а.з. в круге рассчитываем:

$$n_{зер} = \frac{H_{кр} \cdot (R_{нар}^2 - R_{вн}^2) \cdot (58 - 2N_{стр}) \cdot (2v_p + 1) \cdot 10^7}{b_p (10,6N_{зер})^{(2v_p + 1)}} \quad (2.4.4)$$

Общий объем связки в круге:

$$V_{св} = V_{кр} - (V_{абр} + V_n), \quad (2.4.5)$$

где  $V_n$  – объем пор, мм<sup>3</sup>.

Объем пор в круге определим по математической зависимости [96]:

$$V_n = \frac{V_{кр} \cdot (46,5 - K_n \cdot 1,5)}{100}, \quad (2.4.6)$$

где  $K_n$  – коэффициент пористости, величина которого пропорциональна твердости круга.

Общий объем связки в круге:

$$V_{св} = \frac{\pi H_{кр} (R_{нар}^2 - R_{вн}^2) (1,5 K_n + 2 N_{сmp} - 8,5)}{100} \quad (2.4.7)$$

Таблица 2.4.2 - Коэффициент пористости

	H (M1)	I (M2)	J (M3)	K (CM1)	L (CM2)	M (C1)	N (C2)	O (CT1)	P (CT2)	Q (CT3)	R (T1)	S (T2)	T (BT1)	U (BT2)	V (CT1)	W (CT2)
$K_n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Для мягких кругов твердостью H(M1)-Q(CT3) и с номером структуры 1-5 процент содержания связки в инструменте имеет малое значение или отрицательно. Этот факт обуславливает невозможность изготовить абразивный инструмент с данной комбинацией характеристик.

В таблицу 2.4.3 сведены значения процентного содержания связки в шлифовальном круге в зависимости от номера структуры инструмента и его твердости.

Таблица 2.4.3 – Процентное содержание связки в шлифовальном круге [97]

		Твердость шлифовального круга															
		H (M1)	I (M2)	J (M3)	K (CM1)	L (CM2)	M (C1)	N (C2)	O (CT1)	P (CT2)	Q (CT3)	R (T1)	S (T2)	T (BT1)	U (BT2)	V (CT1)	W (CT2)
Номер структуры	1	-	-	-	-	-	1	2,5	4	5,5	7	8,5	10	11,5	13	14,5	16
	2	-	-	-	-	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18
	3	-	-	0,5	2	3,5	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20
	4	-	1	2,5	4	5,5	7	8,5	10	11,5	13	14,5	16	17,5	19	20,5	22
	5	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21	22,5	24
	6	3,5	5	6,5	8	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20	21,5	23	24,5	26
	7	5,5	7	8,5	10	11,5	13	14,5	16	17,5	19	20,5	22	23,5	25	26,5	28
	8	7,5	9	10,5	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21	22,5	24	25,5	27	28,5	30
	9	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20	21,5	23	24,5	26	27,5	29	30,5	32
	10	11,5	13	14,5	16	17,5	19	20,5	22	23,5	25	26,5	28	29,5	31	32,5	34
	11	13,5	15	16,5	18	19,5	21	22,5	24	25,5	27	28,5	30	31,5	33	34,5	36
	12	15,5	17	18,5	20	21,5	23	24,5	26	27,5	29	30,5	32	33,5	35	36,5	38
	13	17,5	19	20,5	22	23,5	25	26,5	28	29,5	31	32,5	34	35,5	37	38,5	40
	14	19,5	21	22,5	24	25,5	27	28,5	30	31,5	33	34,5	36	37,5	39	40,5	42

15	21,5	23	24,5	26	27,5	29	30,5	32	33,5	35	36,5	38	39,5	41	42,5	44
16	23,5	25	26,5	28	29,5	31	32,5	34	35,5	37	38,5	40	41,5	43	44,5	46

Определим объем связки, использованной на формирование мостиков связки  $V_{\Sigma_{м.с.}}$ , а также количество связующего вещества в шлифовальном круге, которое обволакивает а. з., образуя вместе с ним гранулу  $V_{обв.}$ . Общий объем связки, которая затрачивается на обволакивание а.з. в круге, рассчитывается по формуле:

$$V_{обв.} = n_{зеп} (V_{\Gamma} - V_{зеп}) = \pi n_{зеп} \left( \left( \frac{10,6N_{зеп} (C_1 + C_2)}{C_1} \right)^3 - \frac{b_p (10,6N_{зеп})^{(2\nu_p + 1)}}{2\nu_p + 1} \right) \quad (2.4.8)$$

Внутренняя структура шлифовального круга (рис.2.4.4) состоит из:

1) зерен в виде параболоида вращения; 2) обволакивающей их связки диаметром  $d_{м.с.}$ ; 3) мостиков связки радиусом  $R_{м.с.}$  и высотой  $H_{м.с.}$ , которые закрепляют гранулы в шлифовальном инструменте.

Объем мостика связки цилиндрической формы:

$$V_{м.с.} = \pi \cdot R_{м.с.}^2 \cdot H_{м.с.}, \text{ мкм} \quad (2.4.9)$$

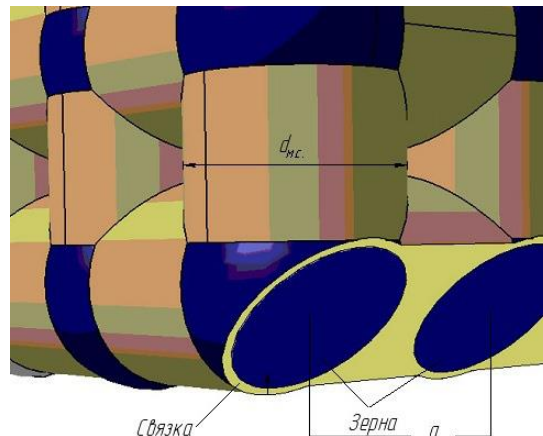


Рис.2.4.4 – Расположение зерна в связке

Высота мостика связки определяется:

$$H_{м.с.} = a - 10,6N_{зеп}, \text{ мкм} \quad (2.4.10)$$

Объем связующего вещества, израсходованной на все мостики:

$$V_{\Sigma_{м.с.}} = n_{зеп} \cdot V_{м.с.} \cdot p_{ср}, \quad (2.4.11)$$

где  $p_{ср}$  – усредненное количество мостиков связки, закрепляющих а.з. в структуре круга:

$$p_{cp} = \frac{p_2 \cdot 2 + p_3 \cdot 3 + p_4 \cdot 4 + p_5 \cdot 5 + p_6 \cdot 6}{n_{зер}}, \quad (2.4.12)$$

где  $p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$  – количество а.з., удерживаемые 2, 3, 4, 5 и 6 мостиками связки.

Для определения  $p_{cp}$  предположим, что 10% а.з., расположенных на рабочей поверхности круга, имеют 2 связующих мостика; 50% – 3 мостика; 20% – 4 мостика; 20% – 5 мостиков. Оставшиеся а.з. находятся внутри шлифовального круга, имеют 6 мостиков связки.

Число а. з. на рабочей поверхности инструмента:

$$n_{зер.раб.пов.} = \frac{l_{раб.пов.} \cdot B \cdot \sqrt[3]{(2 \cdot N_{стр} + 22)^2}}{2 \cdot 1358 \cdot N_{зер}^2 \cdot 10^{-6}} = \frac{\pi \cdot R_{нар} \cdot H_{кр} \cdot \sqrt[3]{(2 \cdot N_{стр} + 22)^2}}{1358 \cdot N_{зер}^2 \cdot 10^{-6}} \quad (2.4.13)$$

Количество а.з., расположенных внутри структуры шлифовального круга:

$$p_6 = n_{зер} - n_{зер.раб.пов.} \quad (2.4.14)$$

Из формул (2.4.9) и (2.4.11) находим радиус мостика связки:

$$R_{м.с.} = \sqrt{\frac{V_{св} - V_{обв}}{\pi n_{зер} p_{cp} (a - 10,6 N_{зер})}} \quad (2.4.15)$$

Рассчитаем параметры внутренней структуры высокопористого шлифовального круга типа 1\*600\*22\*305 с характеристиками 92AF150O12V5, который планируется применить на операции бесцентрового шлифования шеек шипов крестовины карданных валов из цементированной закаленной стали 19ХГН, которая реализуется в условиях производственного процесса АО «Автокомпонент» (г. Ульяновск), АО «Кардан» (г. Сызрань).

1– тип или форма круга, плоский прямой профиль.

600 - наружный диаметр круга, мм.

22 - высота круга, мм.

305 – диаметр посадочного отверстия круга, мм.

92А – обозначение марки абразивного материала (хромотитанистый легированный электрокорунд). Хромотитанистый электрокорунд производят плавкой в электрической дуговой печи глинозема с добавлением легирующих компонентов (оксидов хрома и титана). Легирование двумя компонентами дает возможность

улучшить абразивные свойства материала. Шлифовальные материалы из хромотитанистого электрокорунда благодаря своим высоким абразивным свойствам и механической прочностью вытеснили на ряде ответственных операций абразивной обработки шлифовальные материалы из хромистого электрокорунда.

F150 – средняя зернистость для керамической связки с повышенным содержанием основной фракции в зерне.

O – обозначение степени твердости круга. Данное обозначение соответствует твердости круга – среднетвердая.

12 – номер структуры. Соответствует содержанию 38% абразивного материала, 18% связки для индекса твердости O. Оставшаяся доля структуры круга относится на поры.

V5 – обозначение марки керамической связки.

Используя функциональные возможности системы трехмерного проектирования САТИА, создаем 3D модель круга с вычисленными характеристиками структуры. Расчетные параметры для моделирования круга сведены в таблицу 2.4.4.

Таблица 2.4.4 – Параметры для моделирования шлифовального круга

$n_{\text{зер}}, \text{шт}$	$V_{\text{кр}}, \text{мм}^3$	$V_{\text{абр}}, \text{мм}^3$	$V_{\text{св}}, \text{мм}^3$	$V_n, \text{мм}^3$	$a, \text{мм}$	$V_{\text{обв.}}, \text{мм}^3$	$V_{\text{м.с.}}, \text{мм}^3$	$R_{\text{м.с.}}, \text{мм}$
$7,532 \cdot 10^6$	$1,84 \cdot 10^5$	$7,34 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^4$	0,29	$2,752 \cdot 10^3$	$5,23 \cdot 10^4$	0,13

На рис. 2.4.5 представлена построенная 3D модель структуры исследуемого шлифовального круга.

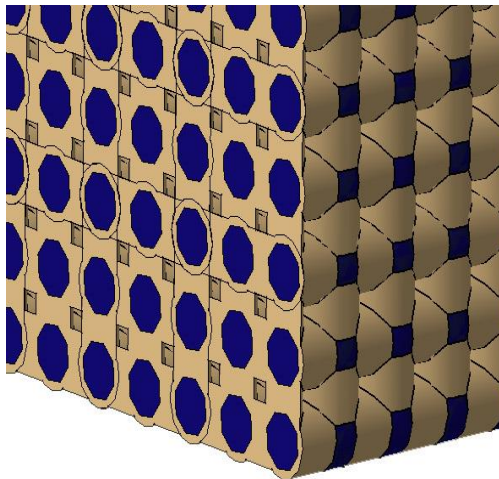


Рис.2.4.5 – Сегмент структуры шлифовального круга  
1\*600\*22\*305 92A F150 O 12 V5

В результате исследований предложен новый вариант методики расчета и построения трехмерной модели абразивного инструмента. Результаты НИОКР могут быть использованы для определения сил удержания абразивного зерна в структуре шлифовального инструмента с использованием CAE-систем.

## **2.5. Определение касательных напряжений сдвига, действующих на абразивное зерно в процессе шлифования**

Моделирование силовых процессов шлифовальной операции в целом – трудная научная задача. На первом этапе данного исследования ограничимся рассмотрением касательных напряжений сдвига, действующих на а.з. в процессе шлифования, и определим зависимости их величины от формы его режущей кромки. Для этого необходимо, используя предложенную в параграфе 2.1. модель режущей кромки а.з., разработать принцип распределения касательных напряжений сдвига по высоте режущей кромки; исследовать влияние параметров формы режущей кромки и глубины ее внедрения в обрабатываемую поверхность на величину касательных напряжений сдвига.

Механическое истирание, разрушение а.з., а также вырыв его из связки обусловлено действием касательных напряжений сдвига. Допустим, что распределение контактных напряжений по поверхности зоны резания постоянно и пропорционально твердости (рис. 2.5.1). Коэффициент трения  $\mu$  постоянен по всей поверхности контакта [82].

Касательные напряжения в плоскости сдвига определим следующим образом:

$$\tau_p = p_k \frac{S}{F}, \quad (2.5.1)$$

$S$  – площадь нормального сечения;

$F$  – площадь сечения, в котором действуют касательные напряжения сдвига;

$p_k$  – касательные напряжения, действующие по контактной поверхности.

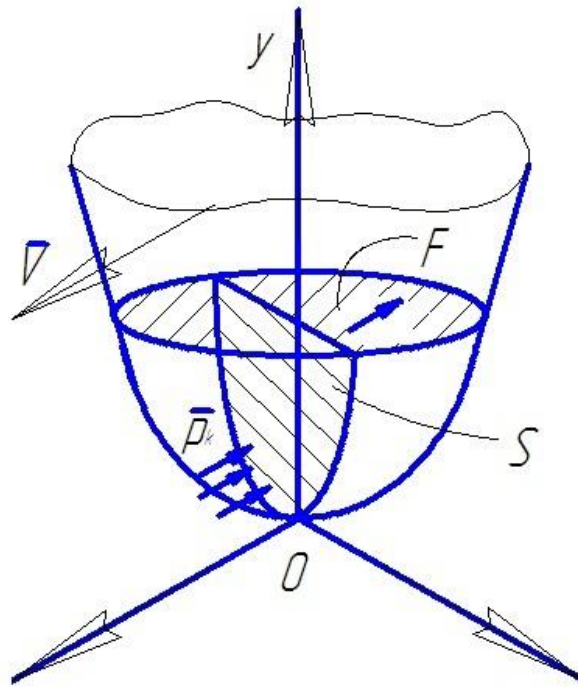


Рис.2.5.1 – Действие касательных напряжений на а.з. при шлифовании

$$p_k = \sigma_n(1 + \mu), \quad (2.5.2)$$

где  $\sigma_n$  – нормальные напряжения.

$F$  и  $S$  – площади соответственно поперечного и продольного сечения.

Согласно [82], существует тесная зависимость между контактными напряжениями и твердостью при вдавливании алмазного наконечника с различными углами при вершине и твердостью обрабатываемого материала HV 6...1500. Предположим, что данная зависимость имеет место и в случае любого другого материала индентора, т.е.  $\sigma_n = \alpha HV$ , где  $HV$  – твердость обрабатываемой поверхности, поскольку напряжения на передней поверхности режущей кромки не могут превышать предельных значений для более мягкой поверхности из пары «обрабатываемый материал» – «инструментальный материал». Принимая во внимание также,

$$\text{же, что } F = \pi b_p^2 y^{2\nu_p}; \quad S = 2 \int_0^y b_p y^{\nu_p} dz = \frac{2b_p y^{\nu_p+1}}{\nu_p + 1} \text{ и } \alpha = 1,23[5]$$

окончательно получаем,

$$\tau_p = \frac{2 \cdot 1,23 HV (1 + \mu)}{b_p \pi (\nu_p + 1)} y^{1-\nu_p} \quad (2.5.3)$$

Из данной зависимости следует, что при увеличении твердости обрабатываемого материала, коэффициента трения, при уменьшении коэффициента наполненности формы а.з. (параметр  $b_p$ ) значение касательных напряжений возрастает. Влияние остальных факторов не столь очевидно, потому рассмотрим влияние параметра формы абразивного зерна ( $\nu_p$ ) и величины его внедрения в обрабатываемую поверхность ( $y$ ) на распределение напряжений сдвига. Для этого исследуем поведение функции

$$\tau_p = \beta \frac{y^{1-\nu_p}}{\nu_p + 1}, \quad (2.5.4)$$

где  $\beta = \frac{2,46 \cdot HV(1+\mu)}{b_p \pi}$ .

Из условия  $\tau_p = 0$  имеем:

$$\nu_p = -1 - \frac{1}{\ln y}$$

$\nu_p \in \left[0; -1 - \frac{1}{\ln z}\right)$  касательные напряжения  $\tau_p$  убывают, а при  $\nu_p \in \left(-1 - \frac{1}{\ln y}; 2\right]$  — растут.

Результаты расчета при различной глубине внедрения  $y$  приведены на рис.2.5.2.

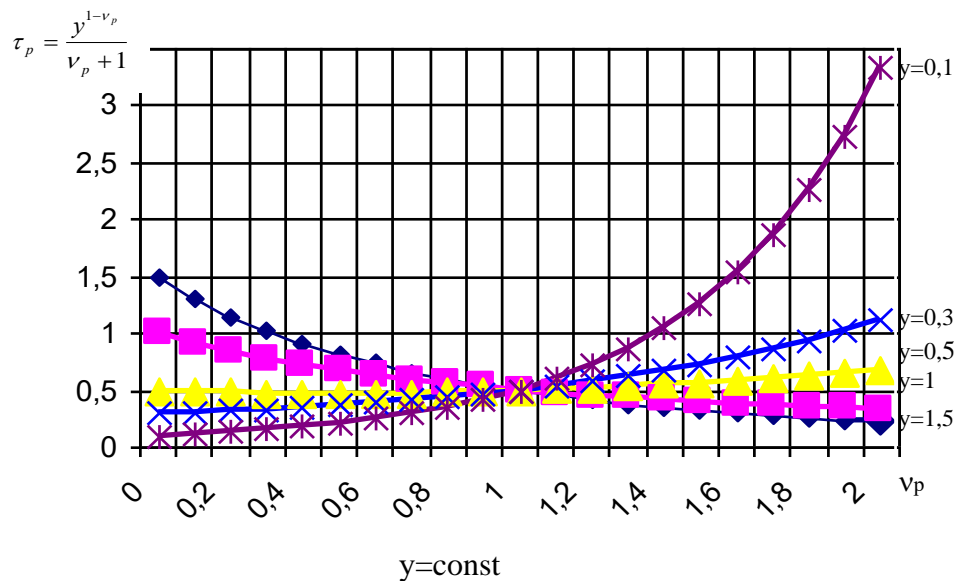


Рис.2.5.2 – Влияние формы абразивного зерна на касательные напряжения сдвига

Из полученных результатов следует, что для уменьшения напряжений сдвига в области значений  $y \in [0; 0.5)$  необходимо уменьшать параметр  $\nu_p$ . При  $y \in (0.5; 0.6)$  параметр  $\nu_p$  не оказывает заметного влияния на величину касательных напряжений. При  $y \in (0.6; \infty]$  величина касательных напряжений сдвига уменьшается с увеличением параметра  $\nu_p$ .

Результаты исследований показывают, что существует форма зерна  $\nu_{pав} = 1$ , при которой, независимо от глубины внедрения зерна в обрабатываемую поверхность, величина напряжений сдвига, действующих на режущую кромку, остается постоянной. Такой поверхностью является конус.

Рассмотрим влияние глубины внедрения абразивного зерна на распределение касательных напряжений в зоне контакта обрабатываемого материала и шлифовального инструмента:

$$\tau_p = \frac{\beta(1 - \nu_p)}{(1 + \nu_p)y^{\nu_p}} \quad (2.5.5)$$

Анализ полученной формулы показывает, что при:

1.  $\nu_p \in [0; 1)$ , величина касательных напряжений возрастает с увеличением глубины внедрения абразивных зерен.
2.  $\nu_p = 1$ , величина  $\tau_{cp}$  постоянна в любом сечении абразивного зерна независимо от глубины его внедрения в обрабатываемую поверхность.
3.  $\nu_p \in (1; 2]$ , касательные напряжения убывают с возрастанием глубины внедрения.

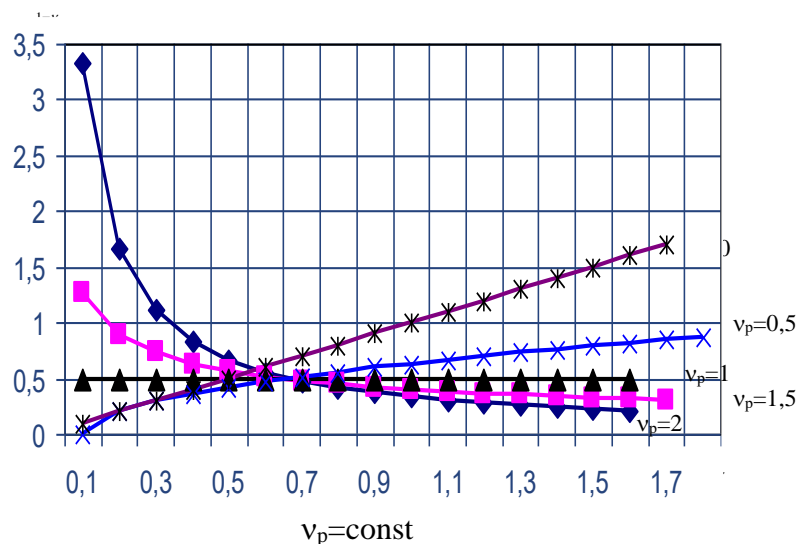


Рис.2.5.3 – Влияние глубины внедрения единичной режущей кромки в обрабатываемый материал на касательные напряжения

Результаты расчета при заданных значениях  $v_p$  приведены на рис.2.5.2. Из полученных данных видно, что с увеличением  $v_p$  быстро растут напряжения при небольших значениях глубины внедрения а.з. в обрабатываемый материал  $y$ , а при  $y \in (0.5; 0.6)$  значения касательных напряжений практически не зависят от  $v_p$ .

Силовые и температурные воздействия на инструмент в процессе шлифования во многом определяются величиной касательных напряжений сдвига, действующих на а.з. Используя предложенную модель а.з., разработана методика оценки распределения касательных напряжений сдвига по его высоте. Исследовано влияние параметров формы зерна и глубины его внедрения в обрабатываемую поверхность на величину касательных напряжений сдвига.

## 2.6. Определение силы резания, действующей на шлифовальный круг в процессе обработки

Проанализировав работы Гинзбурга Б.И., Бакуля В.Н. [77], Малевского Н.П., Попова С.А. [98], Малкина С. и Кука Н.Х. [99], можно составить таблицу процентного распределения видов износа абразивного инструмента в процессе шлифования.

Таблица 2.6.1 – Соотношение основных видов износа абразивного инструмента  $K_{истир}$ , %

№	Виды износа	Гинзбург Б.И, Бакуль В.Н.	Малевский Н.П., Попов С.А.	Малкин С., Кука Н.Х.
1.	Истирание зерна	25	10	10
2.	Разрушение зерна	40	50	45
3.	Вырывание зерна из связки	35	40	45

Из приведенных данных следует, что износ истиранием составляет всего 10-25% от общего износа круга. Однако данный вид износа оказывает непосредственное влияние на силы резания, действующие на единичную режущую кром-

ку абразивного зерна, который, в свою очередь, является причиной разрушения зерна и вырывание его из связки. Исследования износа абразивных зёрен в шлифовальном круге показали, что более 90% абразивов изнашиваются за счет выпадения части зерна из связки и его последующего разрушения. Часть зерен удаляются с рабочей поверхности абразивного инструмента при первом контакте с обрабатываемой поверхностью, другая часть – вследствие увеличения сил, действующих на них по причине образования площадки износа на абразивной режущей кромке.

В связи с этим изучение процесса образования площадки износа в ходе работы абразивного инструмента является актуальной научно-практической задачей. Особенно в разрезе рассмотрения финишной обработки шлифованием высокопористыми кругами деталей из цементированных закаленных сталей.

В теории шлифования следует считать устоявшейся объемную модель зерна без какой-либо площадки износа [90], хотя она образуется на режущей кромке а.з. при первом контакте ее с обрабатываемым материалом заготовки. В работе исследовано влияние этой площадки (рис. 2.6.1) на силы резания, действующие на абразивное зерно в процессе формообразования новых поверхностей.

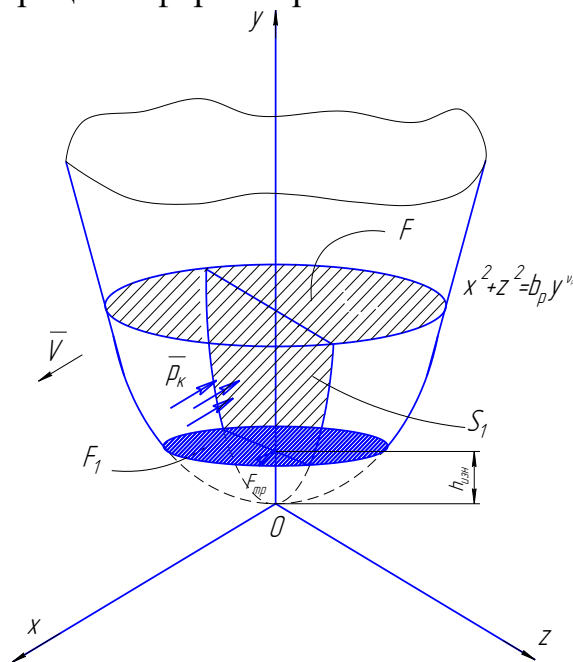


Рис.2.6.1 – Модель изношенной режущей кромки абразивного зерна

В диссертационном исследовании построены схемы силового нагружения единичного зерна в процессе шлифования и расчета суммарной силы резания  $F_p$ , представленные на рисунках 2.6.2 и 2.6.3.

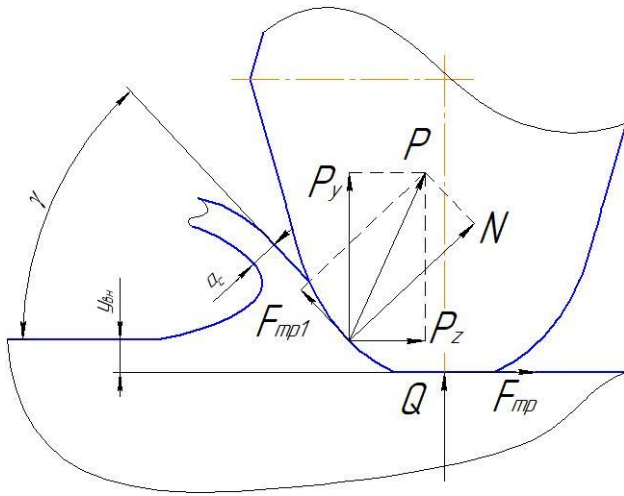


Рис.2.6.2. Схема силового нагружения единичного зерна

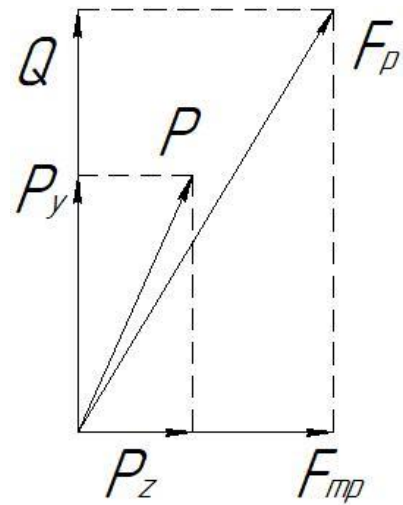


Рис.2.6.3. Схема расчета суммарной силы резания

С.Н. Корчак [84] одним из первых установил физическую взаимосвязь сил резания единичным АЗ с основными параметрами процесса шлифования и, в частности, напряжениями сдвига и сжатия, которые зависят от прочности материала заготовки при реальных скоростях деформации и температурах в зоне шлифования.

При выводе зависимостей для расчета сил предполагалось, что при микро-резании единичным зерном имеют место два процесса: стружкообразование (сдвиг и сжатие) и трение, которые определяют две автономные системы сил, действующих на зерно:

$$P_y = P_{y s} + P_{y \text{ тр}}, \quad (2.6.1)$$

$$P_z = P_{z s} + P_{z \text{ тр}}, \quad (2.6.2)$$

где  $P_{y s}$  и  $P_{z s}$  – радиальная и касательная составляющие силы, вызывающей пластический сдвиг материала заготовки, Н;  $P_{y \text{ тр}}$  и  $P_{z \text{ тр}}$  – радиальная и касательная составляющие силы трения в контакте заготовки с АЗ, Н.

Основываясь на данных зависимостях Корчака С.Н., определим величину суммарной силы резания  $F_p$ , действующую на единичное абразивное зерно в про-

цессе шлифования, через введенные ранее параметры геометрии его режущей кромки –  $b_p$  и  $v_p$ .

Сила резания, действующая на зерно в процессе шлифования:

$$F_p = p_k \cdot S_1 + F_{mp}, \quad (2.6.3)$$

где  $S_1$  – площадь нормального сечения, износившейся истиранием режущей кромки, мм<sup>2</sup>;

$$S_1 = 2 \int_{h_{изн}}^y b_p y^{v_p} dy = \frac{2b_p (y^{v_p+1} - h_{изн}^{v_p+1})}{v_p + 1}, \quad (2.6.4)$$

$p_k$  – касательные напряжения, действующие по контактной поверхности, Па;

$$p_k = \sigma_n (1 + \mu), \quad (2.6.5)$$

где  $\sigma_n$  – нормальные напряжения, Па.

$F_{mp}$  – сила трения между площадкой износа и обрабатываемой поверхностью, Н;

$$F_{mp} = \mu N, \quad (2.6.6)$$

где  $N$  – сила нормального давления на абразивное зерно в процессе шлифования, Н;

$\mu$  – коэффициент трения скольжения.

В соответствии с данными работы [100, с. 125], значение коэффициента трения скольжения  $\mu$  определяется суммой адгезионной  $\mu_a$  и деформационной  $\mu_d$  составляющих, т.е.

$$\mu = \mu_a + \mu_d \quad (2.6.7)$$

Деформационная составляющая  $\mu_d$  при трении скольжении имеет существенное значение для весьма шероховатых поверхностей заготовки, что обусловлено потерями повторного деформирования тонких поверхностных слоев. Соотношение между адгезионной и деформационной составляющими для металлов таково, что при погрешности порядка 1% значением  $\mu_d$  можно пренебречь. Таким образом, принимаем  $\mu = \mu_a$ , так как  $\mu_d$  стремится к нулю.

Прочность адгезионной связи определяется из выражения:

$$\tau = \tau_0 + \beta \cdot p_r, \quad (2.6.8)$$

где  $\tau_0$ ,  $\beta$  – параметры, характеризующие свойства поверхностных слоев обрабатываемого материала [100, стр.127, табл.62].

Фактическое давление на площадку износа абразивной режущей кромки:

$$p_r = \frac{N}{F_1}, \quad (2.6.9)$$

$F_1$  – площадь поверхности износа, мм<sup>2</sup>:

$$F_1 = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2\nu}, \quad (2.6.10)$$

радиусом сечения  $R$  является значение функции  $z = b_p \cdot y^{\nu}$ , где  $y = h_{изн}$ .

На основе этой зависимости:

$$\mu = \mu_a = \frac{\tau}{p_r} = \frac{\tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2\nu}}{N} + \beta \quad (2.6.11)$$

Определим величину высоты изношенной части абразивного зерна через значение удельного износа шлифовального круга  $\rho$  [101, табл.5, стр.32].

$$\rho = \frac{V_{изн.абр.инстр.}}{V_{мет.}}, \quad (2.6.12)$$

где  $V_{изн.абр.инстр.}$  – объем изношенного абразивного инструмента, мм<sup>3</sup>;

$V_{мет.}$  – объем металла, срезанного в процессе шлифования, мм<sup>3</sup>.

Контакт круга с обрабатываемой поверхностью протекает в течение времени  $T_0$ .

Для процесса шлифования известны режимы, при которых происходит сьем припуска при обработке:  $t$  – глубина резания, мм,  $S$  – подача круга, мм/мин,  $V_k$  – скорость вращения абразивного круга, м/с,  $V_3$  – окружная скорость заготовки, м/мин. Зная характеристики процесса абразивной обработки, вычислим объем срезанного металла при шлифовании поверхностей различной формы.

При обработке цилиндрической поверхности (рис.2.6.2):

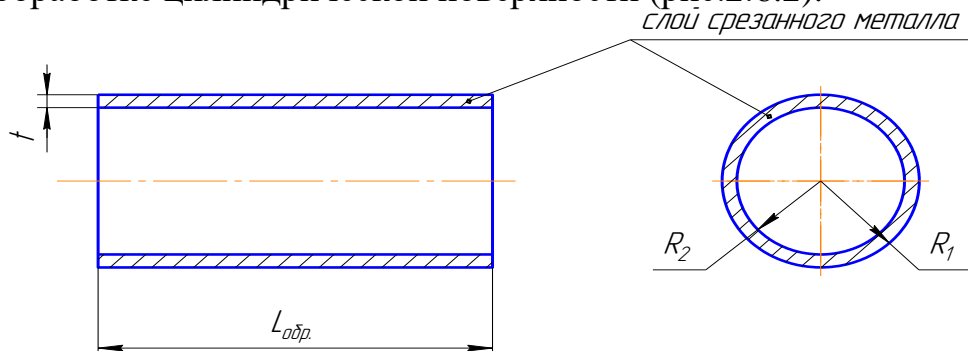


Рис.2.6.2 – Слой срезанного металла при обработке цилиндрической поверхности

Объем срезанного металла:  $V_{мет.} = S_{к} \cdot l_{обр.}$ , где

$l_{обр.}$  – длина обработанной части заготовки, мм:  $l_{обр.} = S \cdot T_0$ .

$S_{к}$  – площадь кольца, мм<sup>2</sup>:

$$S_{к} = \pi(R_1^2 - R_2^2) = \pi(R_1 - R_2)(R_1 + R_2) = \pi \cdot t(R_1 + R_1 - t) = \pi \cdot t(2R_1 - t), \quad (2.6.13)$$

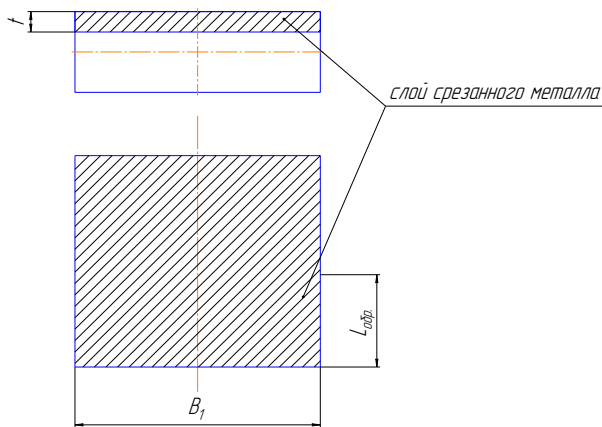
где  $R_1$  – радиус поверхности заготовки, мм;

$R_2$  – радиус обработанной поверхности, мм;

Выполнив математические преобразования, получаем:

$$V_{мет.} = S \cdot T_0 \cdot \pi \cdot t \cdot (2R_1 - t) \quad (2.6.14)$$

При обработке плоской поверхности (рис.2.6.3) объем срезанного металла:



$$V_{мет.} = l_{обр.} \cdot B \cdot t = S \cdot T_0 \cdot B_1 \cdot t, \quad (2.6.15)$$

где  $B_1$  – ширина обработанной поверхности, мм.

Используя зависимость (2.6.12), найдем объем изношенного абразивного инструмента:

$$V_{изн.абр.инстр.} = \rho V_{мет.} \quad (2.6.16)$$

Определим объем изношенного истиранием абразивного инструмента:

$$V_{изн.истир.абр.инстр.} = K_{истир.} \cdot V_{изн.абр.инстр.}, \quad (2.6.17)$$

где  $K_{истир.}$  – коэффициент, характеризующий долю износа истиранием абразивного инструмента при заданных режимах резания (таблица 2.6.1).

Определяем объем изношенных истиранием зерен во всем объеме изношенного истиранием абразивного инструмента:

$$V_{изн.истир.зерен} = \frac{V_{изн.истир.абр.инстр.} \cdot (60 - 2 \cdot (N_{стр} - 1))}{100}, \quad (2.6.18)$$

где  $N_{стр}$  – номер структуры абразивного инструмента.

В процессе износа абразивного инструмента часть зерен вырывается из связки, часть разрушается и на рабочей поверхности остаются лишь зерна с образо-

ванной на них площадкой износа. Найдем количество зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента [86]:

$$n_{\text{зер.раб.пов}} = \frac{\ell \cdot B}{2S_{\Delta}}, \quad (2.6.19)$$

где  $\ell$  – длина рабочей поверхности абразивного инструмента, мм:

$\ell = 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{абр.инстр.}}$ , где  $R_{\text{абр.инстр.}}$  – радиус абразивного инструмента, мм;

$B$  – ширина абразивного инструмента, мм.

$S_{\Delta}$  – удельная площадь абразивной поверхности, приходящаяся на одно зерно, мм<sup>2</sup>:

$$S_{\Delta} = \frac{1358N_{\text{зер}}^2}{\sqrt[3]{(2N_{\text{смп}} + 22)^2}}, \quad (2.6.20)$$

где  $N_{\text{зер}}$  – номер зернистости.

Найдем объем изношенного истиранием сегмента зерна, используя зависимости (2.6.11) – (2.6.15):

$$V_{\text{изн.сегм.зерна}} = \frac{V_{\text{изн.истир.зерен}}}{n_{\text{зер.раб.пов}}} = \frac{2 \cdot 1358 \cdot N_{\text{зер}}^2 \cdot K_{\text{ист.}} \cdot \rho \cdot V_{\text{мет.}} \cdot (60 - 2(N - 1))}{100 \cdot \ell \cdot B \cdot \sqrt[3]{(2 \cdot N_{\text{смп}} + 22)^2}} \quad (2.6.21)$$

Объем изношенного сегмента зерна при интегрировании функции, описывающей образующую единичной режущей кромки:

$$V_{\text{изн.сегм.зерна}} = \pi \int_0^{h_{\text{изн}}} (b_p \cdot y^{\nu_p})^2 dy = \pi b_p^2 \cdot \frac{y^{2\nu_p+1}}{2\nu_p+1} \Big|_0^h = \frac{\pi \cdot b_p^2 \cdot h_{\text{изн}}^{2\nu_p+1}}{2\nu_p+1} \quad (2.6.22)$$

Приравняем выражения (2.6.16) и (2.6.17):

$$\frac{\pi \cdot b_p^2 \cdot h_{\text{изн}}^{2\nu_p+1}}{2\nu_p+1} = \frac{2 \cdot 1358 \cdot N_{\text{зер}}^2 \cdot K_{\text{ист.}} \cdot \rho \cdot V_{\text{мет.}} \cdot (60 - 2(N_{\text{смп}} - 1))}{100 \cdot \ell \cdot B \cdot \sqrt[3]{(2 \cdot N_{\text{смп}} + 22)^2}}$$

Окончательно высота изношенного истиранием сегмента зерна:

$$h_{\text{изн}} = \sqrt[2\nu_p+1]{\frac{2 \cdot 1358 \cdot N_{\text{зер}}^2 \cdot K_{\text{ист.}} \cdot \rho \cdot V_{\text{мет.}} \cdot (60 - 2(N_{\text{смп}} - 1)) \cdot (2\nu_p + 1)}{100 \pi \cdot b_p^2 \cdot \ell \cdot B \cdot \sqrt[3]{(2 \cdot N_{\text{смп}} + 22)^2}}} \quad (2.6.23)$$

Корректируем величину глубины внедрения режущей кромки  $y$ , в связи с появлением площадки износа

$$y_{\text{кор}} = h_{\text{изн}} + y \quad (2.6.24)$$

Преобразуем математическую зависимость (2.6.1). Формула расчета силы резания, действующей на единичную режущую кромку изношенного абразивного зерна, будет иметь вид

$$F_p = \frac{2 \cdot 1,23 \cdot HV \cdot b_p \cdot (N + \tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2v_p} + N\beta) \cdot (y_{кор}^{v_p+1} - h_{изн}^{v_p+1})}{N \cdot (v_p + 1)} + \left( \frac{\tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2v_p}}{N} + \beta \right) \cdot N \quad (2.6.25)$$

По данным работ [13, 21, 30] отношение составляющих сил резания, действующих на единичную режущую кромку  $\frac{N}{F_p} = 1 \div 3$ . Допустим, что  $N = 2 \cdot F_p$ , тогда получаем уравнение вида:

$$F_p^2 \cdot (v_p + 1) \cdot (2 \cdot \beta - 1) + F_p \cdot (2,46 \cdot HV \cdot b_p \cdot (y_{кор}^{v_p+1} - h_{изн}^{v_p+1}) \cdot (1 + \beta) + 1,23 \cdot HV \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^3 \cdot h_{изн}^{2v_p} \cdot (y_{кор}^{v_p+1} - h_{изн}^{v_p+1})) = 0. \quad (2.6.26)$$

Решив его, находим значения силы резания  $F_p$ , действующей на единичное абразивное зерно в процессе шлифования:

$$F_p = \frac{2 \cdot 1,23 \cdot HV \cdot b_p \cdot (y_{кор}^{v_p+1} - h_{изн}^{v_p+1}) \cdot (1 + \beta) + \tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2v_p} \cdot (v_p + 1)}{2 \cdot (v_p + 1) \cdot (1 - 2\beta)} \pm \quad (2.6.27)$$

$$\pm \sqrt{\frac{(2 \cdot 1,23 \cdot HV \cdot b_p \cdot (y_{кор}^{v_p+1} - h_{изн}^{v_p+1}) \cdot (1 + \beta) + \tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2v_p} \cdot (v_p + 1))^2 + 4 \cdot (v_p + 1) \cdot (1 - 2\beta) \cdot 1,23 \cdot HV \cdot b_p \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^2 \cdot h_{изн}^{2v_p} \cdot (v_p + 1)}{2 \cdot (v_p + 1) \cdot (1 - 2\beta)}}$$

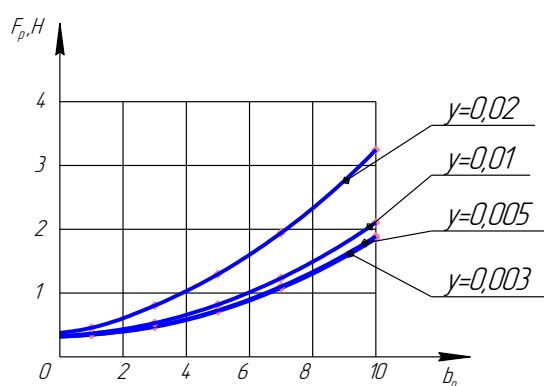


Рис.2.6.4 – График зависимости силы резания от коэффициента наполненности режущей кромки

В ходе работы было исследовано влияние основных параметров абразивного зерна на  $F_p$ . Для определения численного значения высоты изношенной части абразивного зерна воспользуемся значениями характеристик абразивного круга 1\* 600\*22\*305 92А F150 О 12 V5, режимными и силовыми параметрами шлифовальной операции.

Увеличение силы резания при изменении коэффициента наполненности (рис.2.6.4) предсказуемо, что объясняется ростом значения площади контакта режущей кромки с обрабатываемым материалом.

При увеличении коэффициента формы абразивного зерна  $v_p$  (рис.2.6.5) в диапазоне (0 – 0,6) величина силы резания стремительно уменьшается; в интервале  $v_p$  (0,6 – 2) значение силы не значительно изменяется и стремится к 0.

Это явление объясняется уменьшением площади контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом при изменении формы режущей кромки.

Из анализа графических зависимостей рис. 2.6.6 следует, что при различной глубине внедрения зерна в обрабатываемый материал с увеличением высоты износа сила резания увеличивается, что подтверждает необходимость изучения действия площадки износа на процесс шлифования.

В процессе исследования разработана математическая зависимость расчета силы резания с учетом площадки износа. В результате вычислений по разрабо-

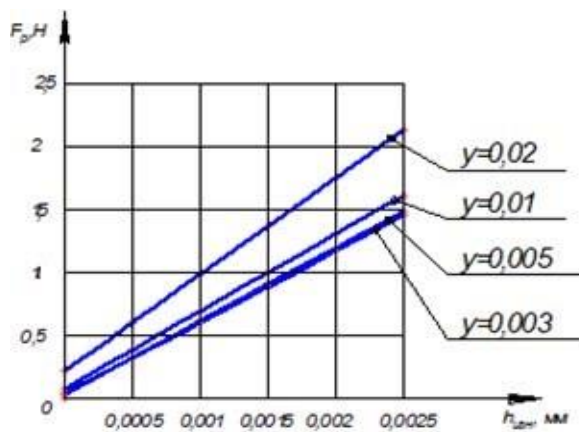


Рис.2.6.6 – График зависимости силы резания от высоты изношенной части зерна

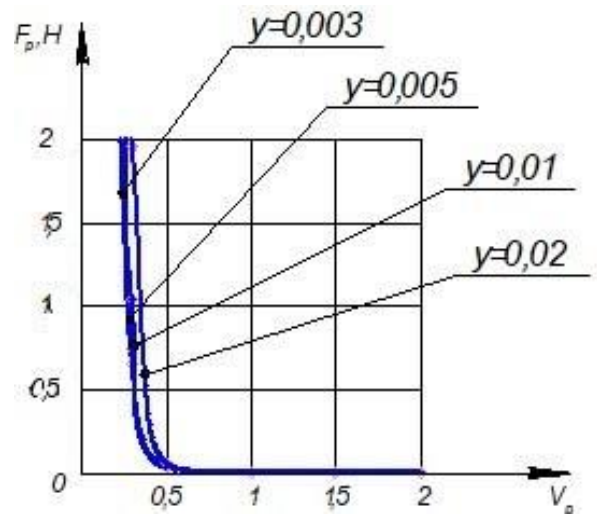


Рис.2.6.5 – График зависимости силы резания от формы а.з.

танным зависимостям сделаны выводы об адекватности математической модели, так как полученные значения силы резания сопоставимы с данными, приведенными Корчаком С.Н. [84] и Осиповым А.П. [102]. Разработанный алгоритм расчета силы резания рекомендуется для использования в инженерных расчетах шлифовальных операций.

## 2.7. Определение максимального усилия удержания абразивного зерна в керамической связке

Для определения удерживающего усилия зерна в структуре абразивного инструмента используем универсальную программную систему конечно-элементного анализа – ANSYS. Применяв математические зависимости для расчета основных геометрических параметров структуры шлифовального круга и силовых характеристик процесса абразивной обработки, разработанные в данной главе диссертационного исследования, определим рациональные режимы процесса бесцентрового шлифования цементированных сталей, определяющие максимальную производительность операции и требуемое качество обработанной поверхности.

Созданную ранее объемную модель структуры шлифовального круга (параграф 2.4 диссертационного исследования) импортировали в ANSYS File-Import (рис. 2.7.1).

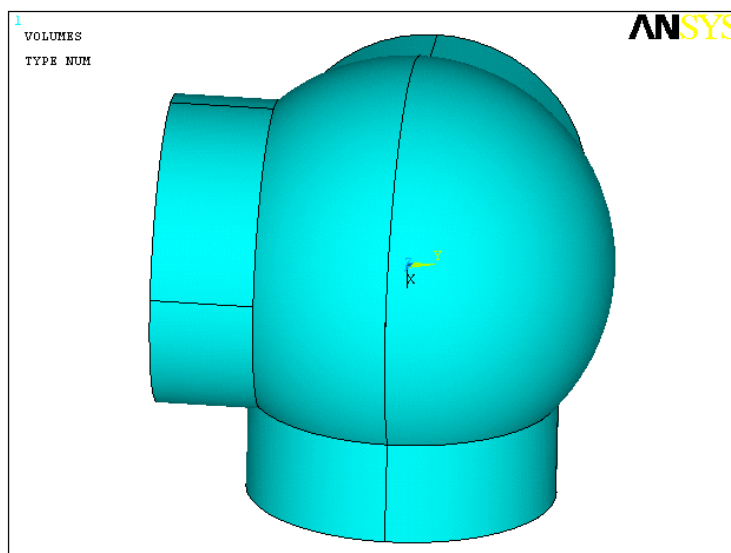


Рис. 2.7.1 – Модель исследуемой части структурной единицы

Используя средства трехмерного проектирования, предоставленные в программе, также можно создать модель по рассчитанным параметрам непосредственно в ANSYS Main\_Menu-Preprocessor-Modeling. В рамках данного диссертаци-

ционного исследования проводились пробные построения модели структуры абразивного инструмента в ANSYS. В качестве входных параметров для моделирования использовались: диаметр зерна, радиус и высота мостика связки, рассчитанные по математическим зависимостям (2.2.11), (2.4.15) и (2.4.10) соответственно.

На созданную модель приложена сила резания, рассчитанная по уравнению (2.6.20), через функцию Main\_Menu-Solution-Define\_Loads-Apply-Structural-Force/Moment и указаны места закрепления ее с соседними структурами Main\_Menu-Solution-Define\_Loads-Apply-Structural-Displacement [103].

Задаем свойства материала модели структуры шлифовального круга – модуль Юнга и коэффициент Пуассона Main\_Menu-Preprocessor-Material\_Models, в появившемся окне, в правой части Structural-Linear-Elastic-Isotropic, здесь регламентируем EX и PRXY – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно. В качестве первого материала заданы параметры керамической связки, для которой при температуре спекания круга в 1300 °С модуль Юнга равен 185 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,25 [104].

Для получения модели шлифовального инструмента, максимально приближенной к реальной, создаем в программе второй тип материала, соответствующий по свойствам абразиву. Для этого в окне Define\_Material\_Model\_Behavior выбираем Material-New\_Mode указываем имя нового материала. Свойства абразива задаются аналогично параметрам связки круга.

Указываем тела модели, которым будет присвоен первый или второй тип материала Main\_Menu-Preprocessor-Meshing-Mesh\_Attributes-Picked\_Volumes, в появившемся окне в строке MAT выбираем номер материала.

Для осуществления расчета необходимо полученную модель разбить на множество элементов, по которым будет производиться расчет. Выбираем тип элемента Main\_Menu – Preprocessor - Element\_Type-Add/Edit/Delete, далее Add... в окне находим Solid-Brick\_8node\_45. Разбиваем модель сеткой произвольной величины Main\_Menu-Preprocessor-Meshing-Mesh-Volumes-Free.

Производим расчет созданной системы Main\_Menu-Solution-Solve-Current\_LS. Вид модели после произведения решения представлен на рис.2.7.2.

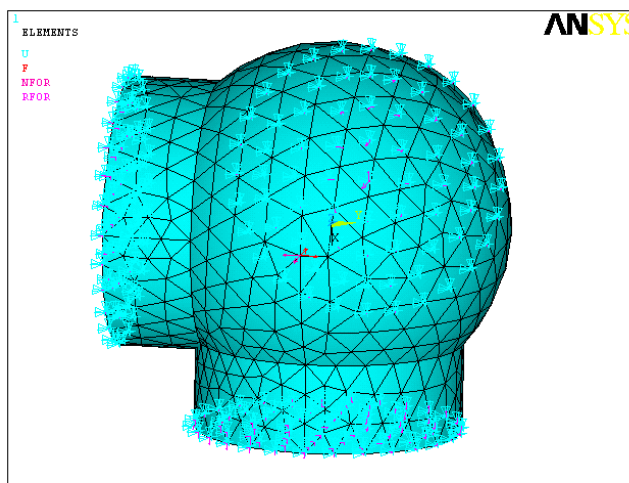


Рис. 2.7.2 – Модель части структурной единицы после произведения расчета системы

После получения решения производим анализ схемы распределения напряжений по Мизесу на мостиках связки, не обращая внимания на напряжение в области расположения абразивного зерна, Main\_Menu-General\_Postproc-Plot\_Results-Contour\_Plot-Nodal\_Solution, в появившемся окне Stress-von\_Misses\_stress. Для получения численных значений Main\_Menu-General\_Postproc-List\_Results-Nodal\_Solution, в появившемся окне Stress-von\_Misses\_stress.

Напряжение по Мизесу характеризует опасность достижения пластической деформации. Если напряжение по Мизесу в точке превышает предел прочности, то в данной области велика вероятность пластической деформации. В нашем случае малейшие пластические деформации будут приводить к разрушению мостиков связки. Сравниваем получившиеся значения напряжений с величиной прочности на изгиб. Необходимо подобрать значение критической силы, приложенной к зерну, которое при ее воздействии на абразивное зерно создаст напряжения по Мизесу, максимально приближенные к пределу прочности на изгиб материала связки, но и не превышающие его величину.

Подставим в разработанный на базе системы ANSYS алгоритм расчета прочности удержания зерна в структуре шлифовального круга значение силы резания  $F_P$ , рассчитанное по математической зависимости (2.6.27).

Вычислив критическую силу, действующую на зерно, находим предельные значения режима резания, при которых производительность процесса шлифования будет максимальной, а износ круга будет минимальным.

Основным режимным параметром, влияющим на силу резания  $F_P$  является врезная подача круга  $S_P$ . Выразим из формулы (2.1.2) радиальную подачу  $S_P$ :

$$S_P = y \cdot \frac{n_{кр}}{n_{заг}} \quad (2.7.1)$$

Из уравнения (2.6.21) найдем  $y_{кор}$ :

$$y_{кор} = v_p^{+1} \sqrt{h_{изн}^{v_p+1} + \frac{2 \cdot F_P \cdot (v_p + 1) \cdot (1 - 2 \cdot \beta)}{2 \cdot F_P \cdot (2.46 \cdot HV \cdot b_p \cdot (1 + \beta) + 2.46 \cdot HV \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot b_p^3 \cdot h_{изн}^{2v_p}}}} \quad (2.7.2)$$

Преобразуя зависимость (2.6.19), получаем  $y$ :

$$y = y_{кор} - h_{изн} \quad (2.4.31)$$

Используя зависимость (2.7.1), находим радиальную подачу  $S_P$ .

С помощью полученной в ANSYS модели внутренней структуры высокопористого шлифовального круга типа 1\* 600\*22\*305 с характеристиками 92A F150 O 12 V5, который планируется применить на операции бесцентрового шлифования шеек шипов крестовины карданных валов из цементированной закаленной стали, например – 19ХГН, находим максимальную глубину внедрения режущей кромки в обрабатываемый материал и оптимальную радиальную подачу в процессе врезного бесцентрового шлифования ( $t=0,1325$  мм,  $n_{заг}=227,4$  об/мин,  $n_{кр}=800$  об/мин,  $D_{заг}=19,33$  мм,  $l_{обр}=12$  мм), при которой производительность процесса обработки будет максимальной, и круг будет продолжать сохранять свою работоспособность весь заявленный производителем период стойкости. Параметры структуры круга вычислены в параграфе 2.4 данного диссертационного исследования. Исходные данные и полученный результат сведены в таблицу 2.7.1.

Таблица 2.4.2 – Исходные данные и результаты вычисления оптимальных режимов шлифования

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение параметра
Предел прочности на изгиб	Н/мм <sup>2</sup>	170
Предел прочности на растяжение	Н/мм <sup>2</sup>	160

Предел прочности на сжатие	Н/мм <sup>2</sup>	1430
Критическая сила нормального давления, N	Н	1
Критическая сила резания, $F_{P \max}$	Н	0,5
Глубина внедрения режущей кромки, $y$	мм	0,001963
Частота вращения шпинделя заготовки, $n_{заг}$	об/мин	227,4
Частота вращения шпинделя круга, $n_{кр}$	об/мин	800
Рациональная радиальная подача	мм/об	0,011
Рациональная радиальная подача	мм/мин	2,5

Распределение напряжений по созданной модели представлено на рис. 2.4.11.

Из приведенной схемы следует, что напряжение на мостиках связки близки к максимальным, но и не превышают предельного значения. Следовательно, приложенные силы будут критическими. При их превышении будет осуществлен вырыв зерна из связующего материала. Данный факт говорит о том, что выбранные режимные параметры процесса шлифования и характеристика шлифовального круга позволяют максимально эффективно использовать возможности абразивного инструмента для получения наибольшей производительности процесса шлифования заготовок из цементированных закаленных сталей.

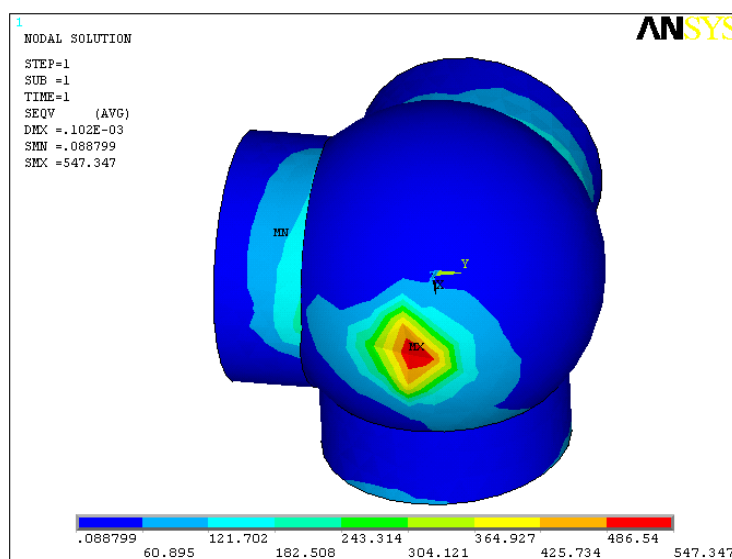


Рис. 2.4.11 – Схема распределения напряжений по Мизесу

На основе разработанных математических моделей созданы предпосылки для разработки алгоритмов их реализации на ЭВМ, которые апробированы в среде математического пакета MathCAD.

## 2.8. Выводы

1. Разработана математическая модель рабочей поверхности круга и его структуры, которая позволяет на этапе проектирования технологического процесса шлифовальной операции осуществить выбор рациональных режимов обработки и характеристики круга.
2. По разработанным математическим зависимостям рассчитано значение параметра  $v_p$ , которое позволяет смоделировать абразивные зерна шлифовального круга, максимально приближенные к реальным размерам и форме.
3. Предложенная модель структуры абразивного инструмента на основе CAD – систем дает возможность определения геометрических параметров структуры шлифовального круга и оценки их влияния на основные характеристики шлифовальной операции.
4. Разработана методика оценки прочности удержания абразивного зерна в связке круга в процессе обработки.
5. Предложена методика для расчета величины силы, вырывающей абразивное зерно из связки шлифовального круга.
6. При использовании полученных зависимостей появляется возможность назначать рациональные режимы шлифования, обеспечивающие увеличение производительности операции шлифования заготовок из цементированных закаленных сталей. Данная технология реализована в условиях производственного процесса АО «Кардан» (г. Сызрань) с использованием высокопористого шлифовального круга *1\* 600\*22\*305 92A F150 O 12 V5*.
7. Расчетные значения геометрических характеристик структуры шлифовального круга, а также качественные характеристики обработанной поверхности, полученные при обработке на заданных рациональных режимах резания, необходимо подтвердить результатами экспериментальных исследований, которые представлены в последующих главах диссертационного исследования.

### 3. Экспериментальные исследования характеристик структуры шлифовального круга

#### 3.1. Определение геометрических и физико-механических параметров абразивного зерна

Во второй главе диссертационной работы показано, что от характеристики ШК зависят размерные и геометрические параметры а.з., рабочей поверхности и структуры инструмента. Они в свою очередь оказывают существенное влияние на силовые и температурные факторы протекания процесса обработки, а также на показатели качества обработанной поверхности. В рамках данной главы стоит задача экспериментального исследования параметров  $b_p$  и  $v_p$ , определения количества режущих и деформирующих зерен на рабочей поверхности круга для подтверждения результатов математического моделирования структуры шлифовального круга, а также с целью наработки базы данных этих показателей, которые будут использоваться в инженерных расчетах по определению рациональных режимов шлифования на этапе технологической подготовки производства.

В рамках экспериментальных исследований необходимо определить и проанализировать возможность использования зависимости параметров микропрофиля структуры ШК от свойств навески абразивного материала и доказать возможность прогнозирования режимных и силовых показателей шлифовальной операции на основе новых геометрических параметров ( $b_p$  и  $v_p$ ), описывающих форму и размеры а.з.

В рамках данной части диссертации предстоит экспериментально определить геометрические параметры а.з. и установить зависимости этих характеристик от марки абразивного материала, зернистости, предприятия изготовителя, а также сопоставить полученные результаты с данными других исследователей.

### 3.1.1. Материалы и образцы, используемые в эксперименте

Наибольшее использование в современной обработке шлифованием имеют электрокорунд и карбид кремния. Для исследования были отобраны зерна электрокорунда марки 92А зернистостей F70(20)-F16(125) производства Челябинского абразивного завода, а также ОАО Юргинские абразивы, карбида кремния зеленого 63С и карбида кремния черного 53С зернистости F90(16)-F36(50) производства Волжского абразивного завода. Последнее обосновано тем, что а.з. из карбидов кремния широко используются при изготовлении и заточке инструментов из твердых сплавов, отличающихся, как и цементируемые стали повышенной износостойкостью. Абразивные зерна были предоставлены предприятиями именно для проведения данных экспериментов. Впоследствии результаты в ходе данных исследований были отправлены для изучения специалистами ВАЗ и ЧАЗ.

Полученные материалы были промыты и очищены от примесей магнитным способом и рассортированы (рис. 3.1.1)



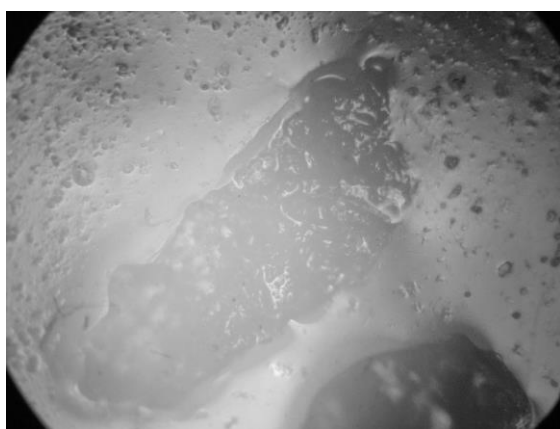
Рис. 3.1.1 – Образцы зерен: а) ОАО «Волжский абразивный завод»;  
б) ОАО «Челябинский абразивный завод»

Анализ ряда работ [13, 53, 105, 106] показал, что для исследования формы а.з. навеску абразивного материала необходимо насыпать на предметное стекло и изучать ее параметры в проходящем свете на оптическом микроскопе, либо на просвечивающем аппарате. В обоих случаях зерно ориентируется в пространстве положением, которое характеризуется расположением его центра тяжести на ми-

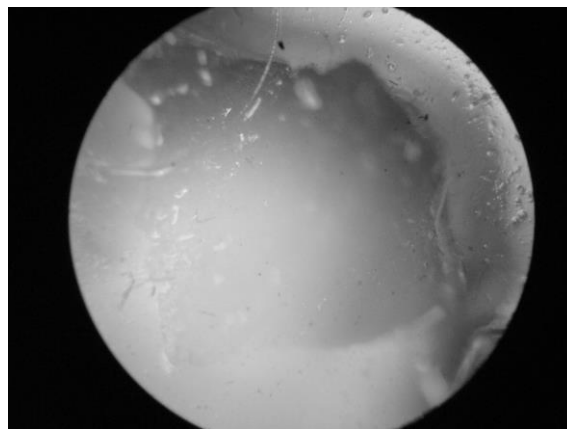
нимальном расстоянии от предметного столика микроскопа. В данной работе была использована возможность получения равновероятного положения зерна при исследовании его формы и размеров, которое соответствует пространственной ориентации а.з. в связке ШК.

В ходе подготовки и проведения эксперимента образцы навесок зерен изготавливались с использованием связующего вещества, моделирующего связку абразивного инструмента. В качестве данного материала был выбран стеарин белого цвета. Технология изготовления образца заключалась в плавлении связующего, введении в него навески абразивного материала, перемешивании и отверждении образцов. Плавление связующего проводили в муфельной печи «Тулячка».

Предварительные исследования на металлографическом микроскопе показали, что абразивные зерна утоплены в связку, из-за чего часть зерна не видна, и провести запись контура зерна не представляется возможным. Использование в качестве связующего прозрачного геля также не дало положительных результатов из-за значительного искажения изображения в силу преломления света на различных участках изображения (рис. 3.1.2).



а)



б)

Рис. 3.1.2 – Фотографии образцов с перемешиванием компонентов

а) часть зерна утоплена в связку (виден объемный рельеф вокруг зерна); б) сильное преломление света не позволяет установить контур зерна

В результате данных опытов было установлено, что наиболее целесообразно насыпать абразивные зерна на поверхность расплавленного связующего. Зерна

при этом располагались хаотично по площади образца и занимали произвольное пространственное положение. Образцы показаны на рис. 3.1.3.

Дальнейшая работа по совершенствованию технологии изготовления образцов для исследований позволила разработать более простой вариант с возможностью проведения экспериментов в проходящем свете. Для этого навеска абразивных зерен насыпалась на отрезок прозрачного скотча, который затем закреплялся на предметном стекле (рис. 3.1.4). В процессе подготовки образца требуется тщательно следить за отсутствием отпечатков и загрязнений на липкой поверхности скотча.



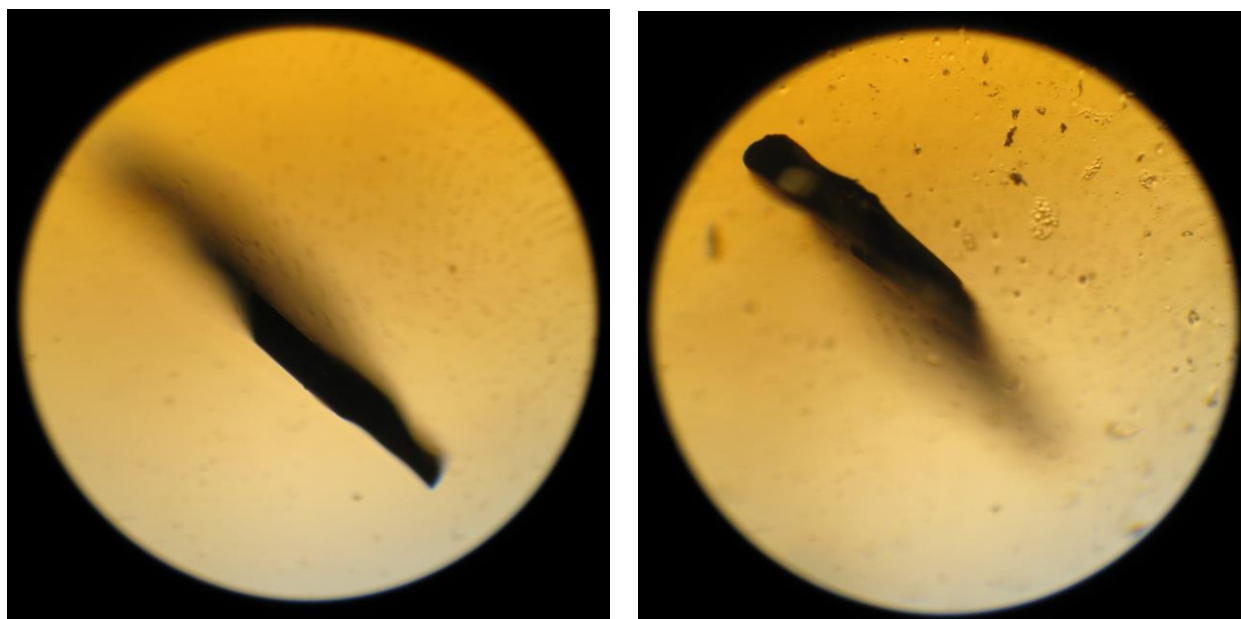
Рис.3.1.3 – Образцы, изготовленные насыпкой абразивного материала на расплавленное связующее



Рис. 3.1.4 – Образец, изготовленный насыпкой навески абразивных зерен на скотч

Случайность ориентации зерен контролировалась с использованием микрометрического устройства микроскопа при наведении на резкость ближних и дальних участков зерен. Процесс данного исследования представлен на рис. 3.1.5.

На фотографии видно, что пластинчатое зерно расположилось главной осью перпендикулярно плоскости наблюдения. Замеры на микрометрическом устройстве показали разность высот наблюдения в 387 мкм. Более половины зерен на образце оказались ориентированными подобным образом. Данные исследования позволили установить, что форма зерен исследованных абразивных материалов может быть условно отнесена к трем разновидностям: изометричным, мечевидным (осколочным) и пластинчатым (игольчатым), что согласуется с выводами ряда авторов научных работ [107, 108]. Установлено, что число изометричных зерен составляет более 60%.



а)

б)

Рис. 3.1.5 – Зерно карбида кремния 63С, зернистость F30, увеличение – x10

а) верхняя граница; б) нижняя граница

Установлено, что мечевидные и изометричные зерна приближаются по форме к эллипсоидам или правильным фигурам (куб, пирамида и т.п.), а пластинчатые зерна имеют наибольший размер в одной из проекций, соответствующих наиболее низкому положению центра масс. В связи с этим для основных исследо-

ваний навеску абразивных зерен насыпали непосредственно на предметное стекло биологического микроскопа.

### 3.1.2. Приборы и измерительная техника

Исследования проводили с помощью современных измерительных комплексов, которые изготавливают российские предприятия [109].

Анализ формы зерен осуществляли на цифровом металлографическом комплексе Микмед-2-1600м и биологическом микроскопе Микромед-2.

Цифровой металлографический комплекс Микмед-2-1600м используется в НИИ, исследовательских лабораториях, на производстве для наблюдения и анализа микроструктуры металлов и сплавов, а также в областях, не связанных с металлографией, для которых допустимо исследование в отраженном свете в светлом поле при прямом освещении.

Цифровой металлографический комплекс оснащен фотоадаптером и цифровой фотокамерой высокого разрешения (в данной конфигурации использовалась фотокамера модели Canon PowerShot A95) (рис. 3.1.6). Наличие фотоприставки дает возможность получать цифровые снимки высокого качества на экране компьютера или телевизора с последующей обработкой или оценкой компьютерными методами.

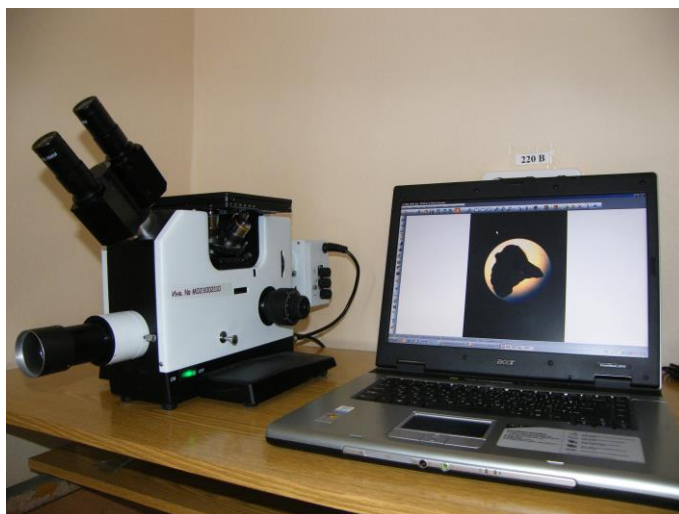


Рис. 3.1.6 – Состав цифрового металлографического комплекса Альтами-мет.1

Характеристики микроскопа Альтами-мет приведены в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1 – Технические характеристики Микроскопа Альтами-мет

<b>Увеличение:</b>	Стандартная комплектация: 100х-1250х
<b>Насадка:</b>	бинокулярная с наклоном 45°, с диоптрийной подстройкой ( $\pm 5$ диоптрий) и изменяемым межзрачковым расстоянием 55-75 мм
<b>Окуляры:</b>	- WF10х/18 мм; - WF12.5х/15 мм; - WF10х/18 мм со шкалой + микрометр (1/0,01 мм); - WF16X/11 (опционально)
<b>Револьверное устройство:</b>	4-х позиционное
<b>Набор объективов:</b>	планахроматические объективы: - 10х/0.25, 20х/0.40, 40х/0.65, 100х/1.25МИ - 2.5х/0.07, 4х/0.10 (опционально)
<b>Предметный столик:</b>	прямоугольный 180х155 мм, диапазон перемещений 75х50 мм 3 сменные вставки
<b>Поляризация:</b>	в комплекте поляризатор, анализатор
<b>Фокусировка:</b>	- коаксиальные винты грубой и точной фокусировки; - встроенный механизм для защиты препарата при быстрой смене; - регулировка плавности хода
<b>Освещение:</b>	- галогенная лампа 30Вт 12В; - плавная регулировка яркости
<b>Система визуализации:</b>	- цифровой фотоаппарат Canon (10-12 MPix); - оптический адаптер; - ПО для управления фотоаппаратом с компьютера

Непосредственно в работе использовались объективы с увеличением  $\times 2,5$ ;  $\times 4$ ;  $\times 10$ ;  $\times 20$ ;  $\times 40$ .

Микроскоп МИКРОМЕД-2 вариант 3-20 (рис. 3.1.7) предназначен для наблюдения и морфологических исследований препаратов в проходящем свете по методу светлого поля, а также по методу темного поля (с конденсором темного поля) и по методу фазового контраста (с фазово-контрастным устройством). Микроскоп Микромед 2 вариант 3-20 может быть использован в различных областях медицины (гематологии, дерматологии, урологии, пульмонологии, вирусологии), а также в биологии, ботанике, химии и других областях науки при диагностических исследованиях в клиниках и больницах, для учебных целей в высших и

средних учебных заведениях. На микроскопе можно изучать окрашенные и неокрашенные биологические объекты в виде мазков и срезов.



Рис. 3.1.7 – Общий вид экспериментальной установки

Микроскоп дополнительно оборудован видеоокуляром и программным обеспечением, а также комплектом визуализации, включающим в себя цифровую камеру (в нашей комплектации - Canon PowerShot A650) с 3-х кратным оптическим увеличением, оптический адаптер для цифровой камеры. Достоинством микроскопа Микромед 2 вариант 3-20 является наличие револьверного устройства на 4 объектива, повернутого от наблюдателя. Технические характеристики микроскопа приведены в таблице 3.1.2.

Таблица 3.1.2 – Технические характеристики микроскопа Микромед-2

Увеличение микроскопа	40 – 1000/1600*
Револьверное устройство	на четыре объектива
Объективы-ахроматы	4x0,1; 10x0,25; 40x0,65; 60x0,85, 100x1,25 ми
Насадка	тринокулярная
Увеличение насадки	1
Видимое увеличение окуляров, крат/поле, мм	10/18, 16/15
Наибольшая числовая апертура конденсора светлого поля	1,25
Размеры предметного столика, мм	135 x 153
Диапазон перемещения препарата, мм	80 x 50
Источник света – галогенная лампа	6 В, 20 Вт
Источник питания – сеть переменного тока	220±22 В; 50 Гц

Непосредственно в работе использовались объективы с увеличением  $\times 10$ ,  $\times 20$ ,  $\times 40$ .

### 3.1.3. Программное обеспечение

Для обработки результатов исследований использовалось специальное программное обеспечение, как созданное разработчиками цифровых измерительных комплексов, так и оригинальное, разработанное в рамках выполнения данной диссертационной работы специально для проведения научных исследований.

При исследовании геометрических параметров режущих кромок для записи изображения с микроскопа, его обработки, использовалось специальное программное обеспечение Image Micro 2.1. Окно работы с программой показано на рис. 3.1.8.

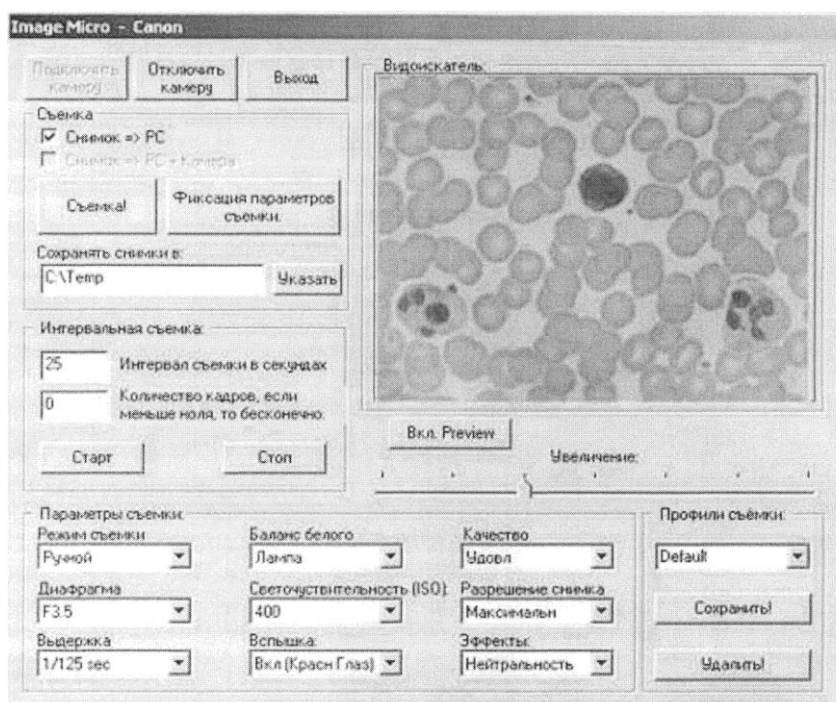


Рис. 3.1.8 – Окно работы с программой Image Micro 2.1.

Программа управления цифровым фотоаппаратом Image Micro 2.1 позволяет не только произвести полную настройку фотоаппарата, подготавливая его к съемке, произвести съемку, а также сохранить все настройки в памяти компьютера, необходимые для данного типа измерений. При этом сохраняются настройки, обеспечивающие правильную цветопередачу и параметры оптического увеличе-

ния, что особенно важно при количественных анализах зернистости материалов и сплавов. Получить повторяемость результатов при ручном способе съемки практически невозможно, поскольку оптическое увеличение фотокамеры при ручной настройке выставить нельзя. Кроме того, программа позволяет обрабатывать изображения и сохранять их в папке с оригинальным названием.

Для обработки результатов исследований по измерению геометрических параметров а.з. использовалось оригинальное программное обеспечение, разработанное студентом механического факультета Дрябовым А.Н. с участием соискателя на кафедре «Технология машиностроения» филиала ФГБОУ ВО «СамГТУ» в г. Сызрани – «Программа исследователь абразивных зерен» (рис. 3.1.9).

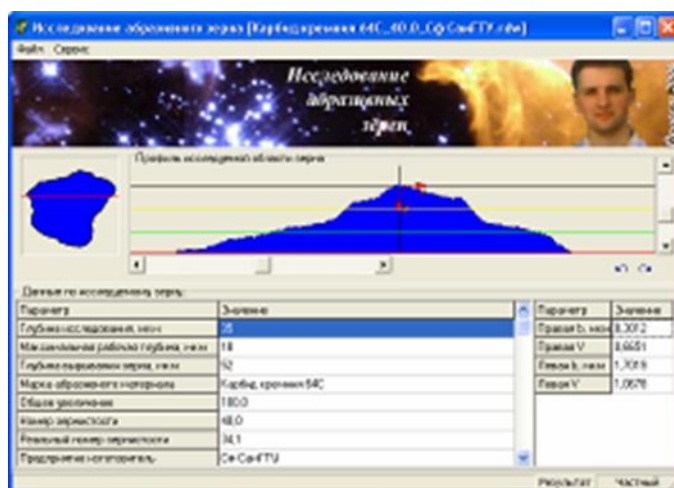


Рис. 3.1.9 – Интерфейс программы «Исследователь абразивного зерна»

Функциональные возможности разработанной программы:

- поддержка работы с форматами графических изображений (\*.BMP, \*.JPG, \*.JPEG);
- возможность обработки исходного изображения, содержащего несколько зёрен;
- возможность обработки изображения автоматически и вручную;
- поддержка работы с несколькими базами данных;
- классификация исследуемых зёрен;
- определение предложенных в рамках диссертационного исследования параметров режущих кромок абразивных зёрен  $b_p(y)$ ,  $v_p(y)$  и  $y_{min}(y)$ ;

- определение традиционных параметров абразивных зёрен: угол при вершине  $\varepsilon(y)$ , радиус вершины  $\rho(y)$ , полуоси аппроксимирующего эллипса и коэффициент формы  $K_\phi$ ;
- получение среднестатистических характеристик фракции зёрен и представление их в виде отчета-документа MS Office Excel;
- редактирование шаблонов формируемых отчётов;
- построение диаграмм рассчитываемых параметров режущей кромки абразивного зерна.

Разработанная программа позволила существенно увеличить объем выборки даже по одному абразивному зерну (720 измерений), что, несомненно, повысило достоверность собираемой информации.

### **3.1.4. Методика определения геометрических параметров режущих кромок**

В данных исследованиях определялись геометрические параметры режущих кромок и абразивного зерна в целом: параметры  $b_p$ ,  $\nu_p$  кривых профиля, описывающих распределение абразивного материала по высоте режущей кромки. Кроме того, определяли угол при вершине а.з. –  $\varepsilon$ , радиус вершины а.з.  $\rho$  и коэффициент формы зерна  $K_\phi$ , как отношение большей полуоси аппроксимирующего эллипса к его меньшей полуоси. На основе полученных результатов рассчитывалось минимальное внедрение режущей кромки в обрабатываемый материал  $y_{min}$  и отношение  $a_z/\rho$ , характеризующее возможность абразивного зерна срезать стружку. Определяли также диапазон значений всех изменяющихся параметров от минимального до максимального.

Отличительными особенностями данных исследований от исследований других авторов [13, 54, 93] являлись:

- исследование параметров режущих кромок в зависимости от глубины внедрения, поскольку неправильная форма зерна предполагает изменение геометрии режущих элементов с глубиной исследования;
- определение параметров не только острых режущих кромок, но и элементов с тупым углом;
- исследование параметров для 360 вероятных положений абразивного зерна на РП АИ, при этом параметры левой и правой частей режущей кромки определялись отдельно;
- определение параметров субмикрпрофиля а.з. для уровня  $d_0/140$ , что соответствует 0,57-7,14 мкм для зерен F150(8)–F20(100) зернистостей соответственно и предполагаемым толщинам стружек 0,2-3 мкм соответственно.

Таким образом, параметры  $b_p$ ,  $v_p$  для каждого уровня исследования усреднялись по 720 определенным значениям, а параметры  $\varepsilon$  и  $\rho$  – по 360 значениям.

Абразивные зерна рассыпались на поверхность расплавленного связующего. Далее подготовленные образцы устанавливались на металлографический микроскоп Альтами-мет.1 или биологический микроскоп Микромед-2. В зависимости от зернистости выбиралось увеличение микроскопа  $\Gamma_M$  и увеличение цифровой фотокамеры  $\Gamma_\phi$ . Увеличение фотокамеры задавалось либо программно, либо определялось по данным записи EXIF-JPEG файла через текущее фокусное расстояние для заданного снимка с помощью графического редактора-конвертера XnView-Win:

$$\Gamma_\phi = \frac{F_n}{F_{\min}}, \quad (3.1.1)$$

где  $F_n$  – текущее фокусное расстояние, мкм;

$F_{\min}$  – минимальное фокусное расстояние для данной фотокамеры, мкм.

Поскольку общее увеличение системы зависит от расстояния от передней фокальной плоскости до объекта и расстояния от задней фокальной плоскости до матрицы фотокамеры, которые нам неизвестны, определялось оптическое увеличение переходной системы, включающей в себя адаптер и окуляр-переходник. Для этого с минимальным увеличением микроскопа -x10 и x1-кратным увеличе-

нием фотокамеры (без увеличения) фотографировалось изображение меры длиной в 1мм (рис.3.1.10).

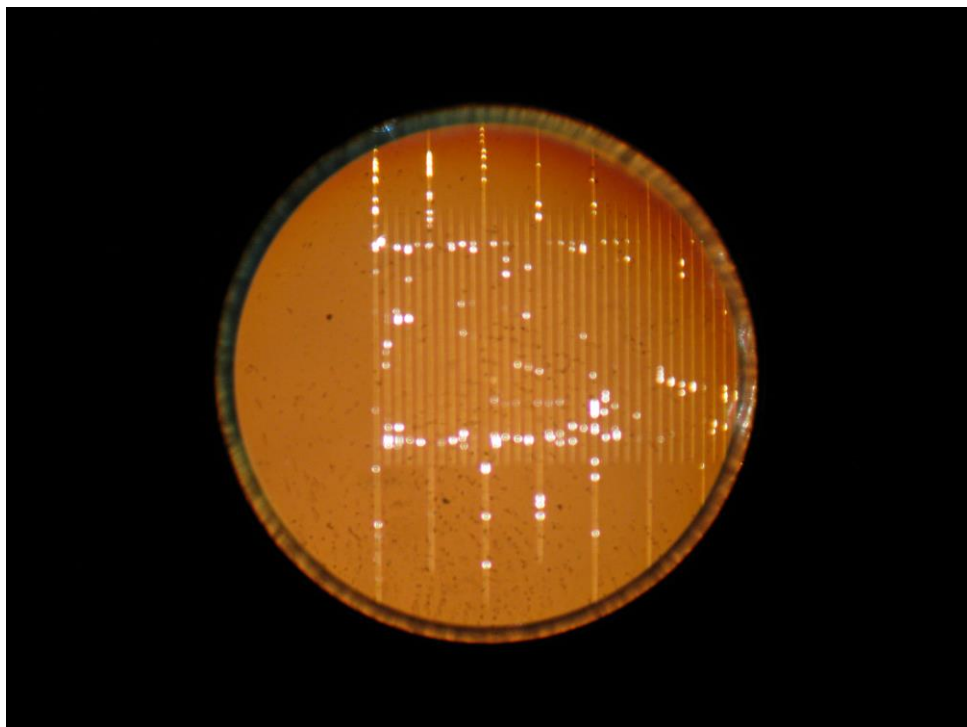


Рис. 3.1.10 – Объект-микромметр, увеличение – х40

Это расстояние измерялось в графическом редакторе «КОМПАС-2D», и рассчитывался масштабный коэффициент, равный количеству пикселей, содержащих 1000 мкм действительного изображения. В данных исследованиях при разрешении изображения 4000x3000 пикселей этот коэффициент равнялся в среднем 112 пикс/1000 мкм. Погрешность определения этого расстояния составила 1 пиксель, то есть менее 1%. Таким образом, чувствительность системы зависела как от увеличения оптической системы, так и от разрешения снимка. Для минимального увеличения оптической системы  $\Gamma_M \cdot \Gamma_\Phi = 10$  для зернистостей 50-100 разрешающая способность системы составила  $1000 \text{ мкм} / 1120 \text{ пикс} = 0,893 \text{ мкм/пикс}$ , то есть менее  $d_0/800$ , что меньше, как было указано выше, первой глубины внедрения, для которой осуществлялся расчет, равной  $d_0/140$ .

Разрешающая способность для различных зернистостей указана в таблице 3.1.3

Таблица 3.1.3 – Разрешающая способность оптической системы при качестве изображения 1600x1200 пик.

Номер зернистости	Увеличение микроскопа, $\Gamma_M$	Фокусное расстояние фотокамеры, $F_n$ , мкм.	Увеличение фотокамеры, $\Gamma_\phi$	Разрешающая способность, $1000 \text{ мкм}/(112 \cdot \Gamma_M \cdot \Gamma_\phi)$ , $\Delta$ , мкм	Количество точек аппроксимации на минимальном уровне, $\frac{d_0}{140 \cdot \Delta}$ , шт.
F20(100)	10	7,4	1	0,893	8
F24(80)	10	7,4	1	0,893	6
F30(63)	10	12,7	1,716	0,52	9
F36(50)	16	7,4	1	0,558	7
F46(40)	16	7,4	1	0,558	6
F54(32)	16	16,8	2,27	0,246	8
F60(25)	16	18,9	2,554	0,218	8
F90(16)	40	7,4	1	0,223	5
F100(12)	40	7,4	1	0,223	5

Как следует из анализа результатов измерений, представленных в таблице 3.1.3, даже на минимальной глубине аппроксимация значений параметров осуществлялось не менее чем по 5 точкам. Для максимальной глубины исследования, которая была принята равной глубине вырывания зерна из связки [110], количество точек для аппроксимации составило не менее 100.

По полученным значениям параметров определялись средние, максимальные и минимальные их значения для фракции одной зернистости или одного абразивного материала.

На данном этапе подготовки эксперимента необходимо определить величину репрезентативной выборки  $n$  требуемого количества фотографий абразивных зерен, которые будут задействованы при проведении дальнейших опытов.

Предварительно в ходе экспериментального исследования сделано 10 фотографий, по данным которых определены параметры  $b_p$  и  $v_p$ . Для каждого из них определим минимальное количество фотографий для получения достоверных результатов.

Требуемое число фотографий  $n$  определяли по математической зависимости [111]:

$$n = \frac{S^2(Y_i) \cdot t_{p(m-1)}^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{2m} \pm \frac{2}{\sqrt{2m}}\right)}{I_p^2}, \quad (3.1.2)$$

где  $S^2(Y_i)$  – дисперсия определяемого параметра;  $t_{p(m-1)}$  – величина коэффициента Стьюдента для вероятности  $p$  при числе замеров  $m$ ;  $I_p$  – задаваемое с вероятностью  $p$  максимальное допустимое значение предельной ошибки выборки;  $m$  – число замеров в предварительном эксперименте.

Величина дисперсии определяется:

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{m}, \quad \text{где} \quad (3.1.3)$$

$x_i$  – значение исследуемого параметра на  $i$ -том опыте,

$\bar{x}$  – среднее значение исследуемого параметра.

Предельная ошибка выборки рассчитывается:

$$I_p = \mu \cdot t_{p(m-1)}, \quad \text{где} \quad (3.1.4)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \quad \text{– средняя ошибка выборки} \quad (3.1.5)$$

Чем больше вероятность  $p$ , с которой гарантируются результаты, тем больше величина коэффициента Стьюдента. Примем требуемую вероятность, с которой гарантируются результаты эксперимента в 0,95.

Результаты оценки по зависимостям (3.1.2) – (3.1.5) показали, что для параметров  $b_p$  и  $v_p$  минимальное количество фотографий для получения достоверных результатов равны  $n_b = 33$  фотографии и  $n_v = 38$  фотографий.

В эксперименте параметры определяются для 3 абразивных материалов 7 видов зернистости. Соответственно в комплексе нам необходимо использовать порядка 800 фотографий. Всего в ходе работы было обработано ~1500 изображений абразивных зерен, что в полном объеме гарантирует получение достоверных результатов исследования.

### 3.1.5. Анализ полученных результатов

#### 3.1.5.1. Анализ результатов эксперимента по значению коэффициента формы а.з. ( $K_\phi$ )

В первую очередь была проанализирована форма абразивных зерен. Исследования показали, что форма зерен, как ранее было установлено и другими исследователями [107,108], варьируется от изометричной ( $K_\phi = 1,0-1,4$ ), приближающейся к правильным телам, через мечевидные ( $K_\phi = 1,4-2$ ) к пластинчатым зернам ( $K_\phi = 2,0-2,8$  и более). При этом коэффициент формы зерен изменяется от 1,02 до 3,8 и более (табл. 3.1.4).

Таблица 3.1.4 – Коэффициент формы абразивных зерен

Зернистость	$K_\phi$			% зерен различных фракций					
	53С	63С	92А	1	2, max	3, min	3+4, min	3+4+5 min	6
F90(16)	1,11-2,48 (1,606)	1,05-2,94 (1,59)	-	0	25	40	65	72	≤3
F70(20)	1,06-2,32 (1,35)	1,09-2,07 (1,45)	1,06-1,92 (1,4)	0	25	40	65	72	≤3
F60(25)	1,06-2,67 (1,747)	1,06-3,29 (1,71)	-	0	30	40	65	67	≤3
F54(32)	1,03-2,25 (1,595)	1,21-3,82 (1,89)	1,07-2,66 (1,59)	0	30	40	65	67	≤3
F46(40)	1,06-2,73 (1,726)	1,11-2,3 (1,56)	1,03-2,61 (1,61)	0	30	40	65	67	≤3
F36(50)	1,08-1,87 (1,401)	1,11-2,29 (1,63)	-	0	25	45	65	72	≤3

F24(80)	-	-	1,02-1,85 (1,38)	0	20	45	70	77	$\leq 3$
Среднее	1,07-2,39 (1,57)	1,11-2,79 (1,64)	1,05-2,26 (1,5)						

Примечание: min-max (среднее) значение

Как следует из данных таблицы 3.1.4, коэффициент формы в среднем мало зависит от материала ( $\pm 5\%$ ). Вместе с тем, пределы изменения  $K_\phi$  показывают, что зерна 92А более изометричны. Среди зерен 63С чаще встречаются пластинчатые зерна, а зерна 53С находятся по этому параметру посередине. Анализ показывает, что для всех материалов  $K_\phi$  имеет минимум на зернистостях F70(20), затем повышается и после зернистости F36(50) снижается. Исследования показали, что данная зависимость обусловлена особенностями рассева зерен, а именно процентным содержанием той или иной фракции (см. таблицу 3.1.4). Увеличение доли крупной фракции увеличивает  $K_\phi$ , внутри одной схемы рассева (зернистости F60(25) – F54(32) – F46(40) и F90(16) – F70(20)) более крупные зернистости имеют меньший  $K_\phi$ .

На рис. 3.1.11 показано распределение зерен по изометричности.

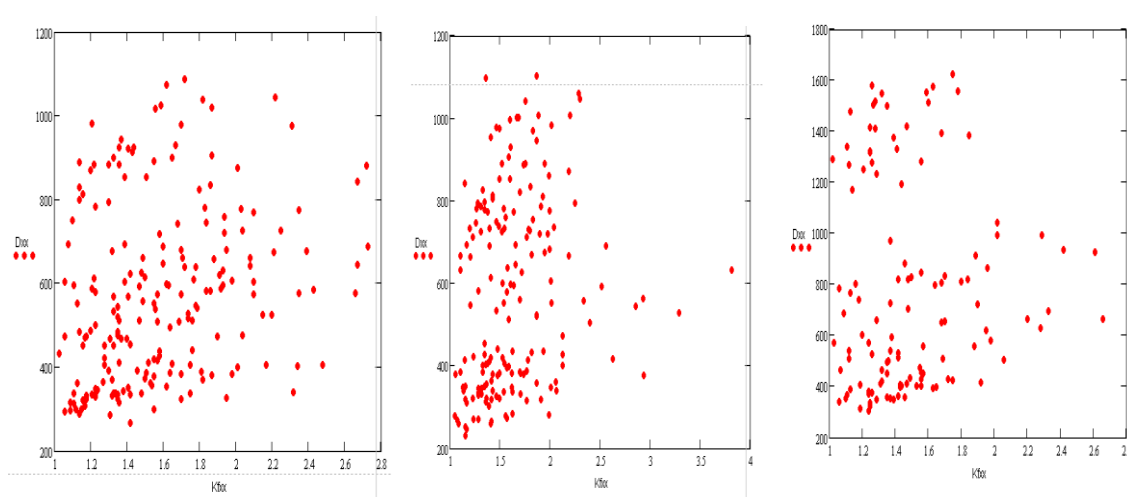


Рис. 3.1.11 – Распределение зерен по изометричности

а) 53С; б) 63С; в) 92А

Из представленных графиков следует, что большая часть зерен имеет коэффициент формы 1,0-2,2 для карбида кремния и 1,0-2,0 для электрокорунда нормального, и только 10% зерен имеют большой коэффициент формы. Зерна с  $K_\phi > 2,8$  практически отсутствуют. Заметна также тенденция некоторого увеличения

коэффициента формы с увеличением размера зерен в пределах зернистости. Это можно объяснить только тем, что через ячейки сита крупных зернистостей проваливаются зерна достаточно вытянутой формы. Особенно эта тенденция заметна по пустым областям на графиках, которые соответствуют отсутствующим зернистостям.

На рис. 3.1.12 показано распределение зерен по изометричности в сравнении с исследованиями, проведенными Дубинкиным Н.М. [110] и Люкшиным В.С. [112]. Эти авторы использовали в качестве коэффициента формы отношение площади описанной окружности к площади проекции зерна. Следует полагать, что если диаметр описанной окружности соответствует максимальному размеру зерна, а полуоси аппроксимирующего эллипса пропорциональны соответствующим размерам (максимальному и ему перпендикулярному), то коэффициент формы должны быть равны.

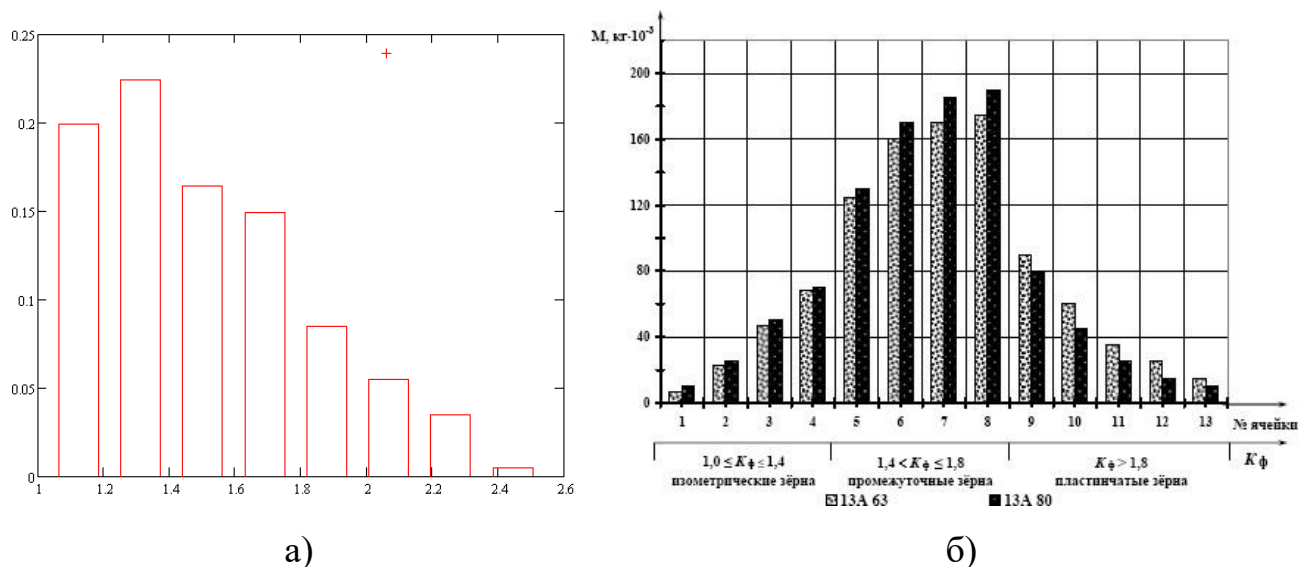


Рис.3.1.12 – Содержание зерен той или иной формы в навеске:

а) процентное содержание в навеске зерен 53С зернистостей F90(16)- F36(50) Челябинского АЗ;

б) распределение исходной массы шлифовальных зерен 13А F30(63) и 13А F24(80)

ОАО «Юргинские абразивы» по форме

Как следует из сравнения, коэффициент формы зерен сильно варьирует. Большая часть зерен имеет промежуточную форму (мечевидную), но в зависимости от технологии (производителя) доля изометричных зерен может быть сравни-

ма с долей зерен промежуточной формы (ОАО ЧАЗ) или с долей зерен пластинчатой формы (ОАО Юргинские абразивы).

Из представленных изображений абразивных зерен видно (рис. 3.1.13), что если отдельные режущие кромки – острые – еще можно представить в виде конуса с округленной вершиной, то многие режущие кромки, особенно на изометричных зернах, представляют собой довольно протяженные элементы с плоской вершиной. У мечевидных и пластинчатых зерен наличие более острых кромок просто предполагает наличие и более плоских и более протяженных участков, которые, по мнению предыдущих исследователей, являются нережущими или тупыми. Действительно, по данным работы [113], для многоугольника с числом сторон  $n$  сумма внутренних углов равна  $180^\circ \cdot (n - 2)$ .

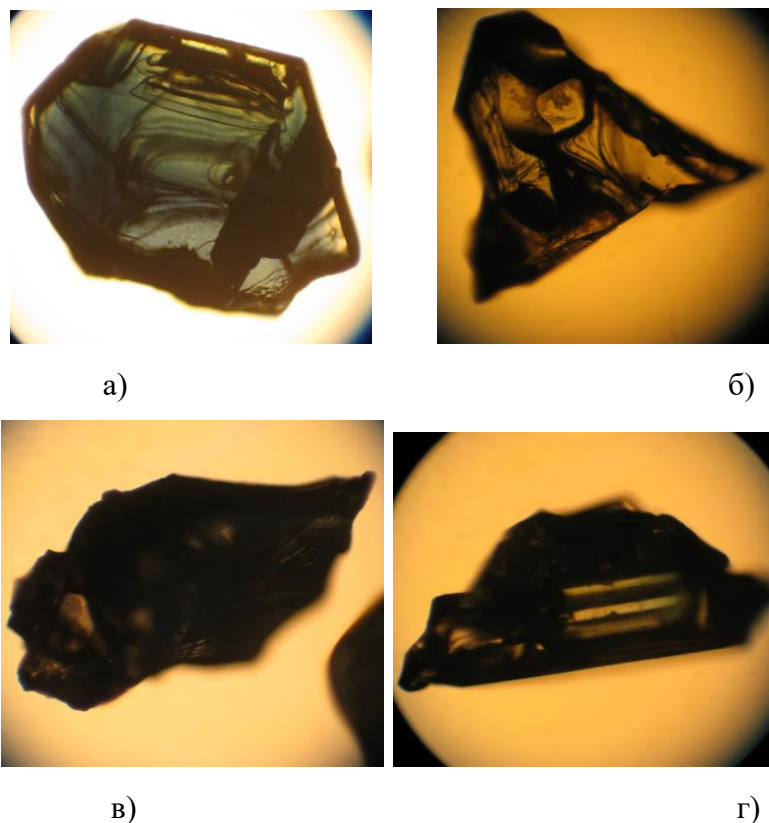


Рис. 3.1.13 – Зерна карбида кремния 63С, увеличение x12-x14

- а) изометричное зерно в виде куба; б) изометричное зерно в виде треугольной пирамиды;  
 в) мечевидное (осколочное) зерно; г) пластинчатое (игольчатое) зерно

Из этого следует, что для четырехугольного пластинчатого зерна на рис. 3.1.13, она будет составлять  $360^\circ$ , а при сумме двух острых углов приблизительно  $70^\circ$  два других внутренних угла должны иметь величину в среднем  $145^\circ$ .

Можно предположить, что наиболее эффективными будут абразивные зерна правильной многоугольной формы в плане с внешним углом  $2 \cdot \beta_1 < 360/n$  или числом сторон  $n < \frac{180}{\beta_1}$ . Для углеродистых, малолегированных и цементированных сталей – это семиугольник, для жаропрочных сталей – пятиугольник или квадрат, для жаропрочных сплавов – треугольник. Нетрудно заметить, что зерна алмазов и кубического нитрида бора, способные эффективно резать титановые сплавы, имеют много зерен в виде треугольной – четырехугольной пирамиды. Более того, как показали наши исследования, зерна такой формы имеются и в навеске иных абразивных материалов. Иными словами, представленные простые зависимости связывают обрабатываемость материала с формой абразивных зерен, причем важен не только  $K_\phi$ , но и сама форма. Идеальной формой зерна с точки зрения универсальности использования, исходя из представленных рассуждений, будет шар, сочетающий высокую прочность с возможностью отделения стружки при достаточном заглублении в обрабатываемую поверхность.

### 3.1.5.2. Анализ результатов эксперимента по значению размеров а.з.

Анализ размеров зерен показал, что большинство зерен в любой зернистости тяготеют по размерам к предельной, крупной или основной фракции согласно определениям ГОСТ 3647-80 (табл. 3.1.5).

Таблица 3.1.5 – Оценки размеров абразивных зерен

Зернистость	Максимальный размер, мкм			Длина, мкм			Ширина,		
	53С	63С	92А	53С	63С	92А	53С	63С	92А
F90(16)	285- 410 (355)	231- 416 (320)	-	265- 406 (335)	215- 402 (296)	-	190- 345 (266)	172- 322 (245)	-
F70(20)	268- 418 (346)	259- 422 (356)	303- 435 (379)	260- 414 (325)	246- 410 (335)	271- 424 (355)	213- 373 (282)	181- 347 (270)	246- 360 (304)

F60(25)	369- 774 (542)	317- 796 (460)	-	365- 771 (509)	308- 647 (422)	-	304- 547 (387)	232- 491 (330)	-
F54(32)	431- 778 (593)	440- 811 (638)	368- 697 (532)	413- 748 (566)	440- 798 (607)	353- 657 (502)	347- 528 (439)	224- 555 (427)	304- 490 (393)
F46(40)	510- 1044 (713)	581- 1046 (820)	572- 1040 (804)	482- 959 (657)	580- 1020 (761)	568- 1034 (754)	384- 728 (530)	411- 795 (627)	445- 705 (585)
F36(50)	694- 1086 (905)	632- 1102 (863)	-	669- 1072 (851)	607- 1097 (814)	-	617- 885 (740)	405- 905 (632)	-
F24(80)			970- 1624 (1387)			927- 1618 (1330)			776- 1330 (1128)

Примечание: min-max (среднее) значение

Это объясняется, видимо, тем, что в 2008 г. введен в действие новый ГОСТ Р 52381-2005. Зерна, полученные для испытаний, классифицированы по новому ГОСТу. По сравнению с ГОСТ 3647-80 в новом стандарте изменен размер ячеек сит, которые используют для классификации шлифзерна, в сторону увеличения, а также наблюдается отсутствие соответствия данного параметра нормальному ряду, поскольку размеры сит соответствуют стандарту FEPA 41-D.

Можно заметить, что значения максимального размера зерна равны для целых групп зернистостей: F90(16) и F70(20), F60(25) и F54(32), F46(40) и F36(50), F24(80). Это, по-видимому, объясняется ранее отмеченной зависимостью от рассева шлифзерна и рациональностью изготовления в этом случае отдельных зернистостей группы из одной навески. Более того, это указывает на возможность прохождения через ячейки сита более крупных зерен, если они ориентированы наибольшим размером перпендикулярно плоскости ячейки.

Контроль зернистости шлифзерна (зернистости F90(16)-F10(200)) проводится ситовым методом: контролируется только остаток на ситах, а размер зерен не

контролируется. Сита изготавливаются согласно ГОСТ 6613-86 «Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками».

В квадратную ячейку по диагонали может провалиться зерно большее, чем размер ячейки в свету, если зерно имеет вытянутую форму. Следовательно, на сите задерживаются зерна с минимальным размером, равным размеру ячейки сита в свету, и зерна, предельные по размеру, прошедшие сквозь сито большей фракции. Определим предельный размер зерна, полагая, что он ограничен наибольшей в свету проекцией зерна (случай, когда размер ячейки сита равен поперечному сечению зерна, признается как маловероятный, поскольку зерно в навеске несвободно и ориентируется по самому низкому положению центра масс).

Представим зерно эллипсом, каноническое уравнение которого

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (3.1.6)$$

Оси  $Ox$  и  $Oy$  направим по диагоналям ячейки сита. Тогда, обозначая сторону ячейки сита  $d$ , уравнение для стороны сита запишется как

$$y = \frac{d}{\sqrt{2}} - x. \quad (3.1.7)$$

Выразив из обоих уравнений  $y^2$  и приравняв их, выражая полуоси через  $a = K_\phi \cdot b$ , получим следующее квадратное уравнение

$$x^2 \cdot (k^2 + 1) - \sqrt{2} \cdot d \cdot x + \left( \frac{d^2}{2} - k^2 a^2 \right) = 0. \quad (3.1.8)$$

Поскольку эллипс только касается квадрата, уравнение должно иметь одно решение. Для этого необходимо, чтобы определитель был равен 0. Решив это уравнение, получим

$$a = \frac{d}{\sqrt{2(k^2 + 1)}}, \quad (3.1.9)$$

где  $k = 1/K_\phi$ .

По данным некоторых авторов, например [106], соотношение ширины к длине составляет в среднем  $b/a = 0,7$ . Для этого отношения размер зерна составит  $2a = 1,158 \cdot d$ . Для наших исследований  $k = 0,935 \dots 0,5 - 0,385$ , следовательно,  $2a =$

(1,033...1,265–1,32)·*d*. Были рассчитаны средневероятные размеры зерна каждой зернистости с учетом распределения формы зерен по коэффициенту изометричности и предельным условиям ГОСТ Р 52381-2005 на присутствие зерен той или иной фракции в данной зернистости. В первом случае – максимальный размер зерна – полагалось, что в навеске присутствуют зерна только крупной и основной фракций (сита 2 и 3), во втором – минимальный размер зерна – ГОСТ Р 52381-2005 допускает отсутствие зерен предельной и крупной фракции (сита 2 и 1), наличие зерен основной, подосновной, пятой и мелкой фракций (сита 3, 4, 5, 6). Данные расчета представлены в таблице 3.1.6.

Таблица 3.1.6 – Расчетный средневероятный размер зерна

Зернистость		92А				63С и 53С			
FEPA	ГОС Т 3647- 80	Усло- вие max	$K_{\phi max}$	Усло- вие min	$K_{\phi min}$	Усло- вие max	$K_{\phi max}$	Усло- вие min	$K_{\phi min}$
F24	80	891,4	12,7	596,2	8,5	906,8	12,95	606,5	8,7
F30	63	751,8	11,9	507,8	8,1	764,9	12,1	516,6	8,2
F36	50	629,4	12,6	423,7	8,5	640,3	12,8	431,1	8,6
F46	40	450,7	12,5	278,8	7,7	458,5	12,7	283,6	7,9
F54	32	379,2	11,8	236,0	7,4	385,8	12,1	240,1	7,5
F60	25	317,7	12,7	198,3	7,9	323,2	12,9	201,7	8,1
F70	20	265,3	13,3	166,9	8,3	269,9	13,5	169,8	8,5
F90	16	225,2	14,1	139,5	8,7	229,1	14,3	141,9	8,9

Хотя среднее значение по всем материалам и зернистостям составляет  $K_{\phi} = 10,6$ , как видно из таблицы, изменение значения этого параметра могут сильно варьироваться (7,4 – 14,1) даже при соответствии условиям ГОСТ Р 52381-2005. Сравнение с данными таблицы 3.3.4 показывает, что минимальный размер зерен коррелирует с условиями максимума, когда в навеске присутствуют зерна только крупной и основной фракций.

Из вышесказанного следует сделать вывод, что привязка к среднестатистическому размеру зерна при моделировании структуры РП АИ, моделировании съема металла или шероховатости является существенным недостатком теории, особенно для АИ на основе абразивных материалов по новому ГОСТ Р 52381-2005.

### **3.1.5.3. Анализ результатов эксперимента по определению значений минимальной глубины внедрения режущих и деформирующих а.з. в обрабатываемый материал**

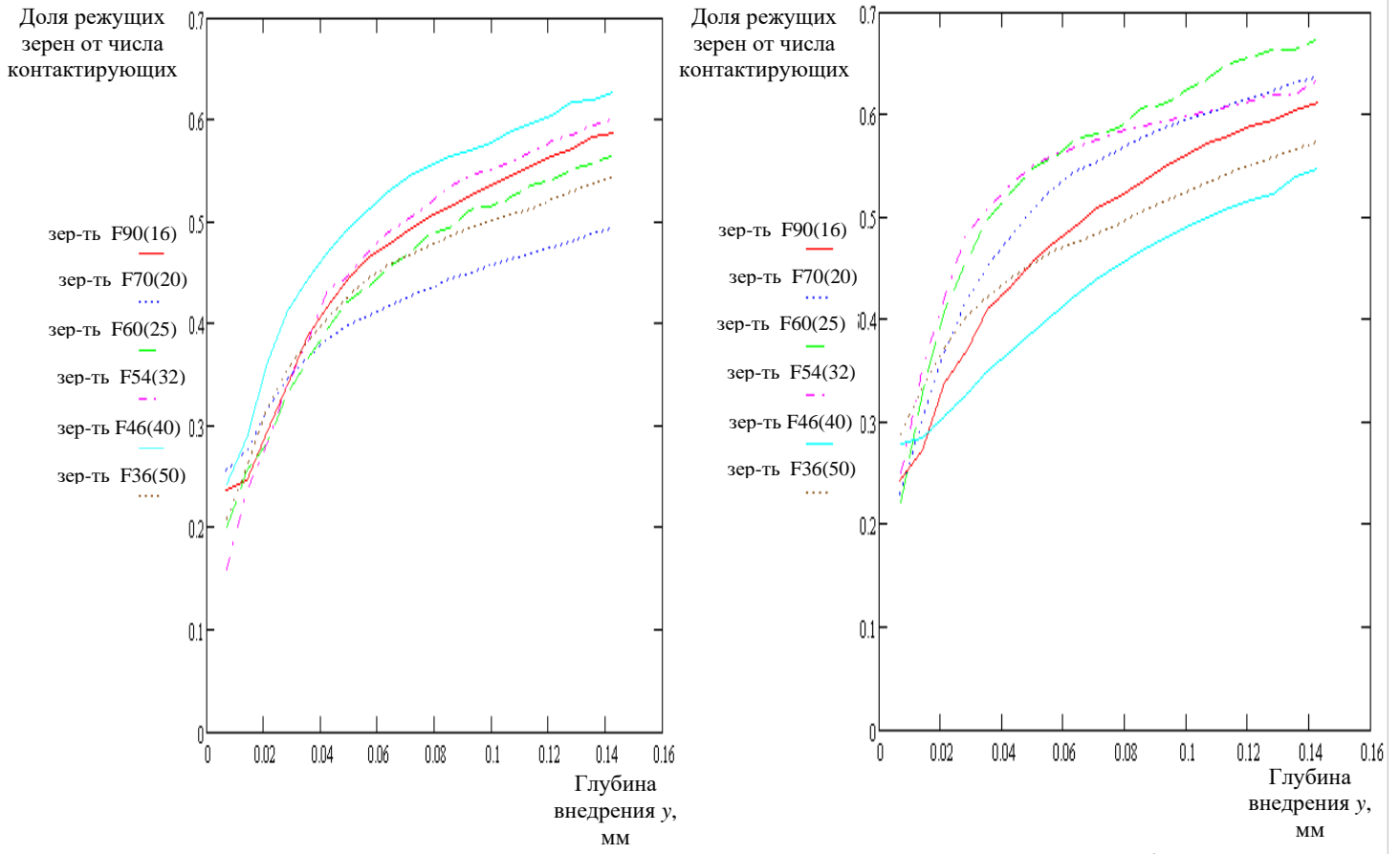
Предварительные расчеты минимальной глубины внедрения для режущих кромок с усредненными значениями геометрических параметров  $b_p$ ,  $v_p$  показали, что эти данные соответствуют режущим крокам, не производящим работу по отделению стружки на всей глубине исследования, так как значения  $y_{min}$  на всех уровнях исследования превышали значения этих уровней. Этот вывод выявил необходимость выделения кромок, отделяющих стружку, и усредненных геометрических параметров  $b_p$ ,  $v_p$  для условно «режущих» и «тупых» кромок отдельно. Данная функция была добавлена в последнюю версию программы «Исследователь абразивных зерен» вместе с возможностью определения процентного содержания «режущих» кромок в зависимости от глубины исследования.

Величина съема металла и производительность процесса шлифовальной операции напрямую зависит от количества режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального круга. В последние годы появились новые математические модели процесса шлифования [8, 114-117], в качестве одной из характеристик которых исследователи вводят параметры количества режущих зерен.

Вопрос об отнесении кромки к режущей решался с помощью программного обеспечения «Исследователь абразивных зерен» в зависимости от минимальной глубины внедрения.

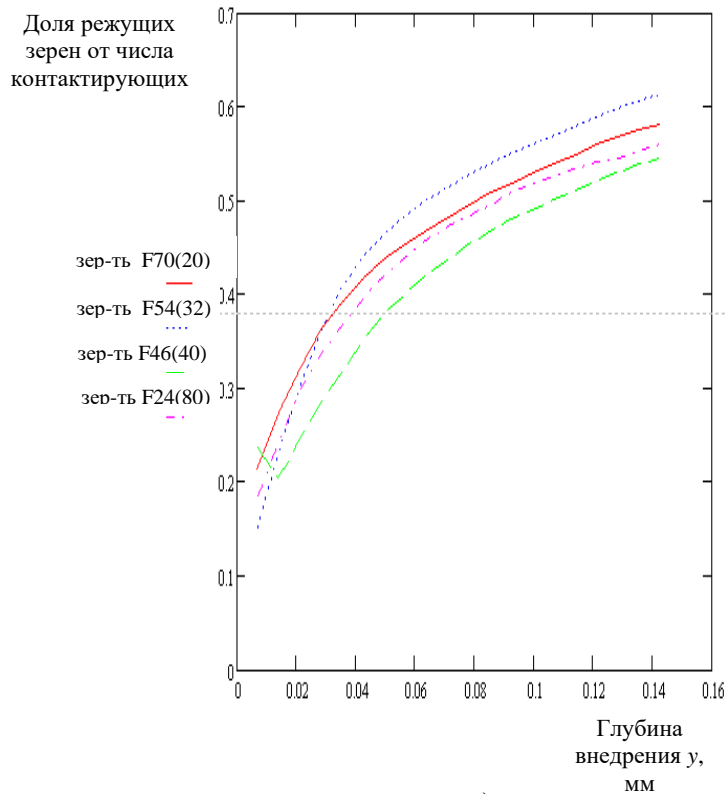
Средние значения процента режущих кромок для фракций различных материалов и зернистости в зависимости от глубины исследования приведены на рис. 3.1.14. Анализ полученных данных показывает, что процент режущих зерен не

является величиной постоянной – он возрастает с глубиной его внедрения в обрабатываемый материал.



а)

б)



в)

Рис.3.1.14 – Средние значения доли режущих зерен от числа контактирующих

а) 53С; б) 63С; в) 92А

Данный факт говорит о том, что геометрические параметры зерна изменяются с глубиной внедрения. Это объясняет различие данных по величине режущих зерен у разных исследователей, которые проводили оценку количества режущих зерен различными методами [110, 119, 120, 178]. Как показывают результаты проведенных экспериментов, количество режущих зерен на небольшой глубине составляет 15-25% для материала 53С, 22-28% для материала 63С и 15-20% для материала 92А.

Это больше, чем 10-15%, как полагают большинство исследователей [13, 118, 119, 122, 178], и соизмеримо с данными, приведенными в работе Светковского Ф.Ю. и Ивановой Т.Н. [123], которые утверждают, что режущих зерен на рабочей поверхности инструмента порядка 25%. Доля режущих зерен возрастает с глубиной исследования, достигая на достаточно большой глубине 49-63% для материала 53С, 57-67%, для материала 63С и 56-61% для материала 92А.

Из графиков на рис.3.1.13 видно: разброс значений у разных зернистостей для электрокорунда 92А меньше, чем для карбида кремния 63С, и еще меньше, чем для карбида кремния 53С. Все же строгой зависимости от зернистости не наблюдается, хотя установлено, что при переходе на другую формулу рассева эта зависимость изменяется. Например, у карборунда 53С для зернистостей F60(25), F54(32) и F46(40) процент режущих кромок растет, а при переходе к зернистости F36(50) – падает, в тоже время у карборунда 63С для зернистостей F60(25), F54(32) и F46(40) процент режущих зерен падает, а при переходе к зернистости F36(50) – растет.

Отличие подхода, принятого в настоящей работе, от традиционного в том, что предыдущие исследователи [53, 115, 118, 121, 122, 178] (кроме Л.Г. Глейзера [125]), приравнивали количество режущих зерен к количеству контактирующих абразивных зерен. Различное внедрение зерен в обрабатываемый материал при различных условиях проведения опытов давало различные результаты.

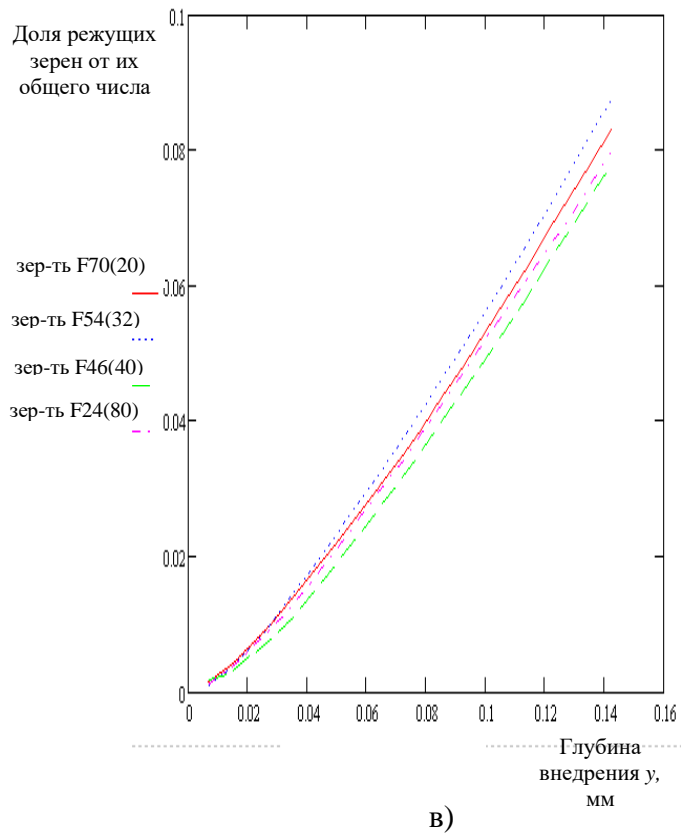
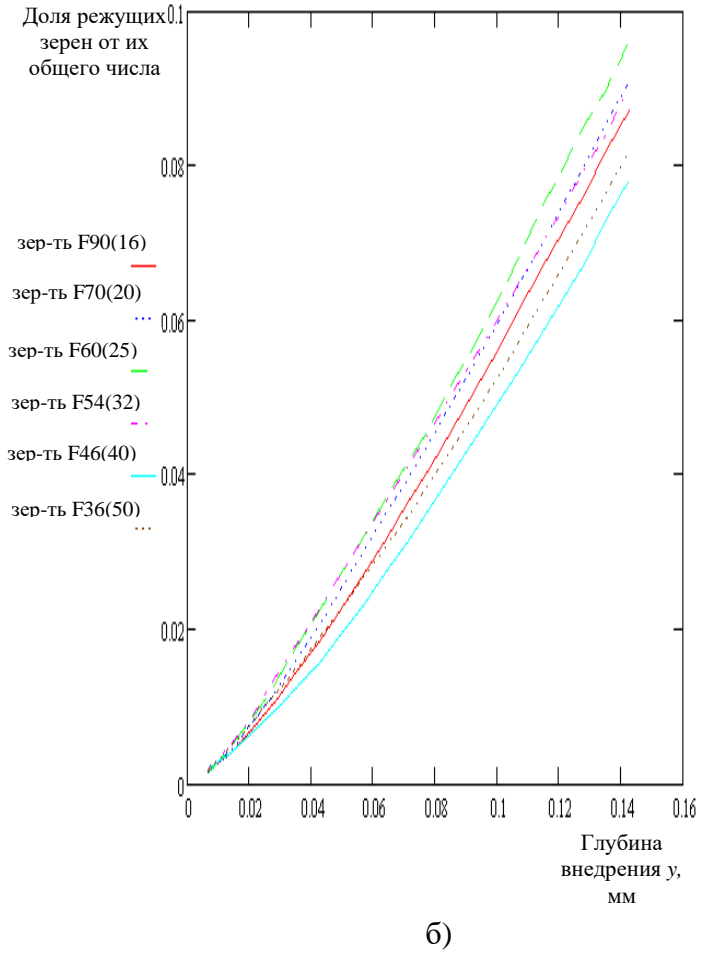
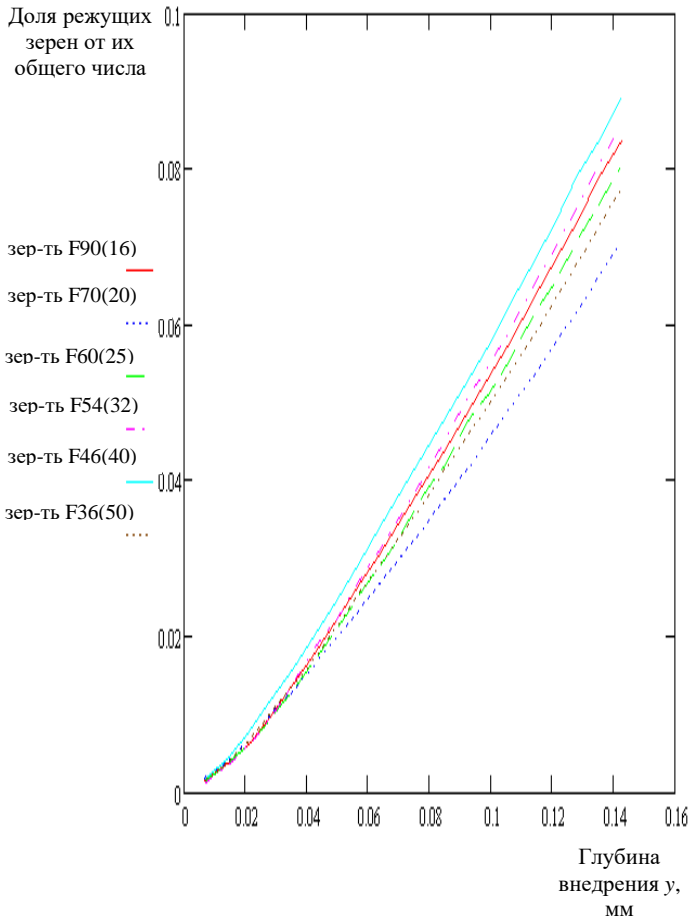


Рис. 3.1.15 – Средние значения доли режущих зерен от общего числа: а) 53С; б) 63С; в) 14А

В данной работе определяется не только количество контактирующих абразивных кромок, но и процент режущих среди них. При равномерном распределении абразивных кромок по глубине количество контактирующих режущих кромок пропорционально глубине: на уровне  $0,1d_0$  – 10%,  $0,5d_0$  – 50% и т.п. Таким образом, для заданных материалов количество режущих кромок в зависимости от глубины внедрения в обрабатываемый материал составит (рис. 3.1.15).

### 3.1.5.4. Анализ результатов исследований по определению значений коэффициентов $b_p$ , $\nu_p$ режущих и деформирующих а.з.

Средние значения параметров  $b_p$ ,  $\nu_p$  для фракций различных материалов и зернистости в зависимости от глубины исследования для «режущих» кромок приведены на рис. 3.1.16-3.1.17, а для «деформирующих» - на рис. 3.1.18-3.1.19.

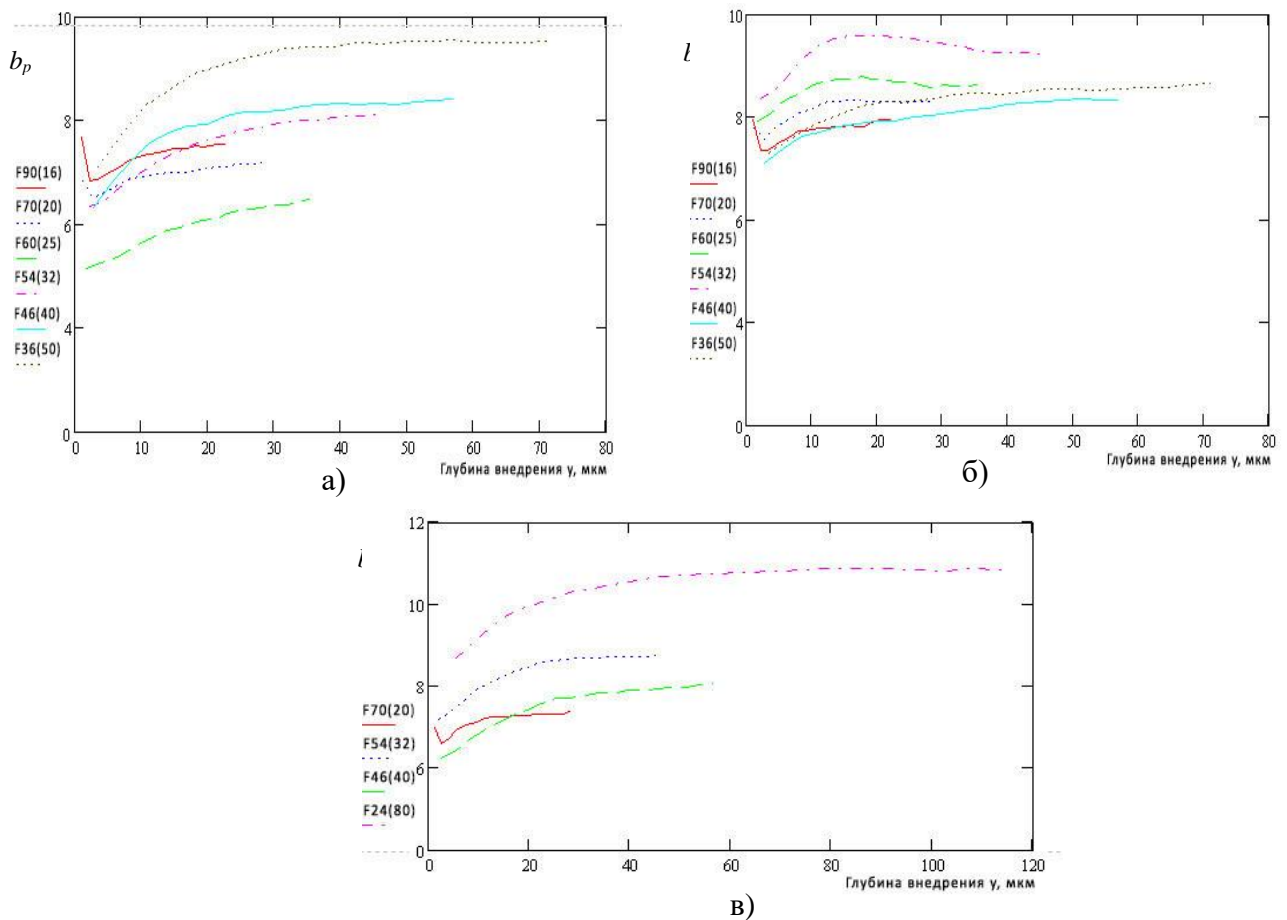


Рис. 3.1.16 – Значения средних параметров  $b_p$  для «деформирующих» кромок

а) 53С; б) 63С; в) 92А

Анализ результатов показывает, что параметр  $b_p$  возрастает с глубиной исследования, асимптотически приближаясь к постоянному значению. В целом, режущие кромки имеют меньшие значения параметра  $b_p$ , чем деформирующие, но в обоих случаях значение параметра зависит от зернистости: чем больше номер зернистости (размер зерна), тем больше  $b_p$ . Сравнение значений при относительных глубинах исследований доказывает пропорциональность значений  $b_p$ . Характер изменения параметра  $v_p$  для разных режущих кромок отличается: у деформирующих кромок он снижается с увеличением глубины исследования, а у режущих кромок – растет.

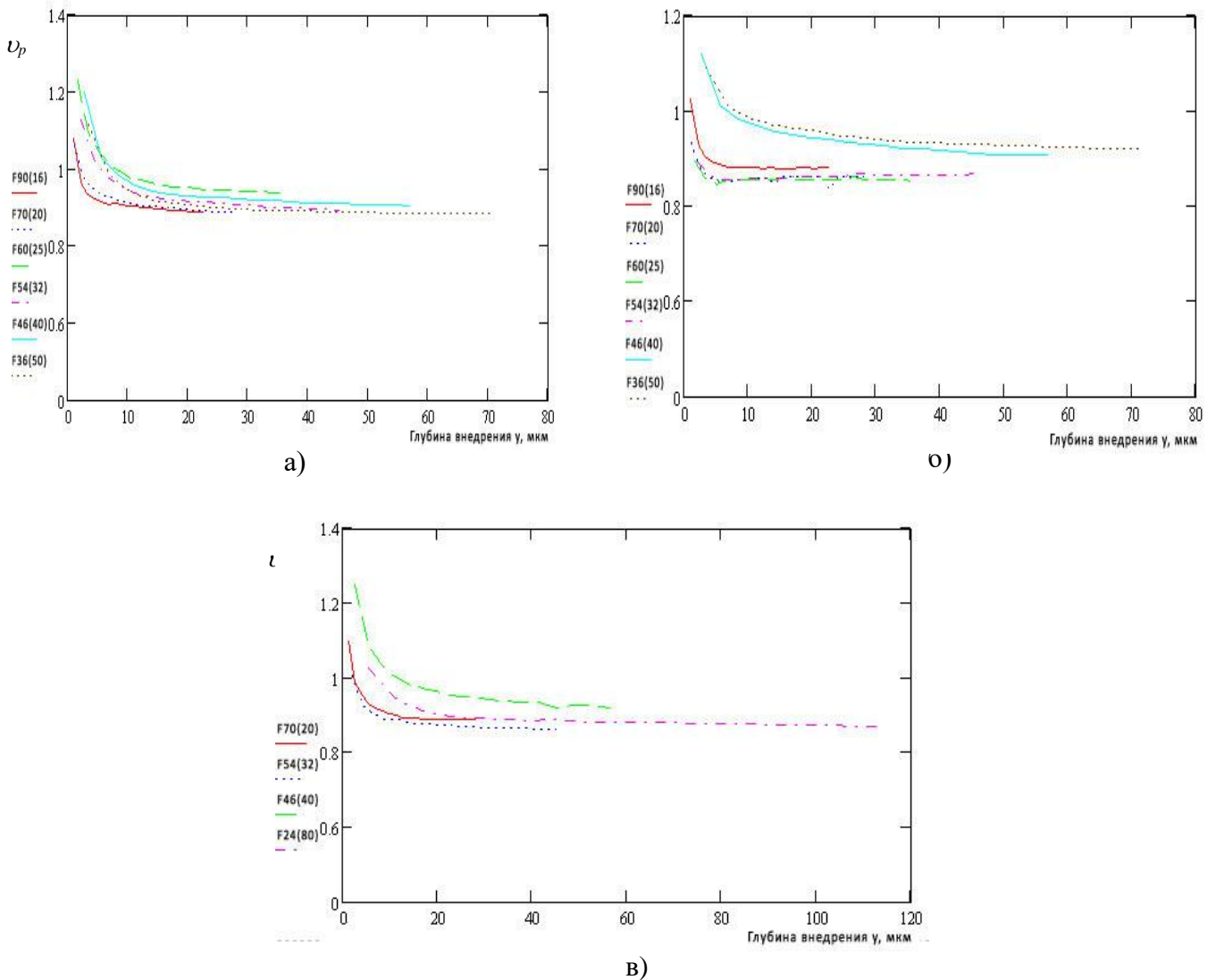


Рис. 3.1.17 – Значения средних параметров  $v_p$  для «деформирующих» кромок  
а) 53С; б) 63С; в) 92А

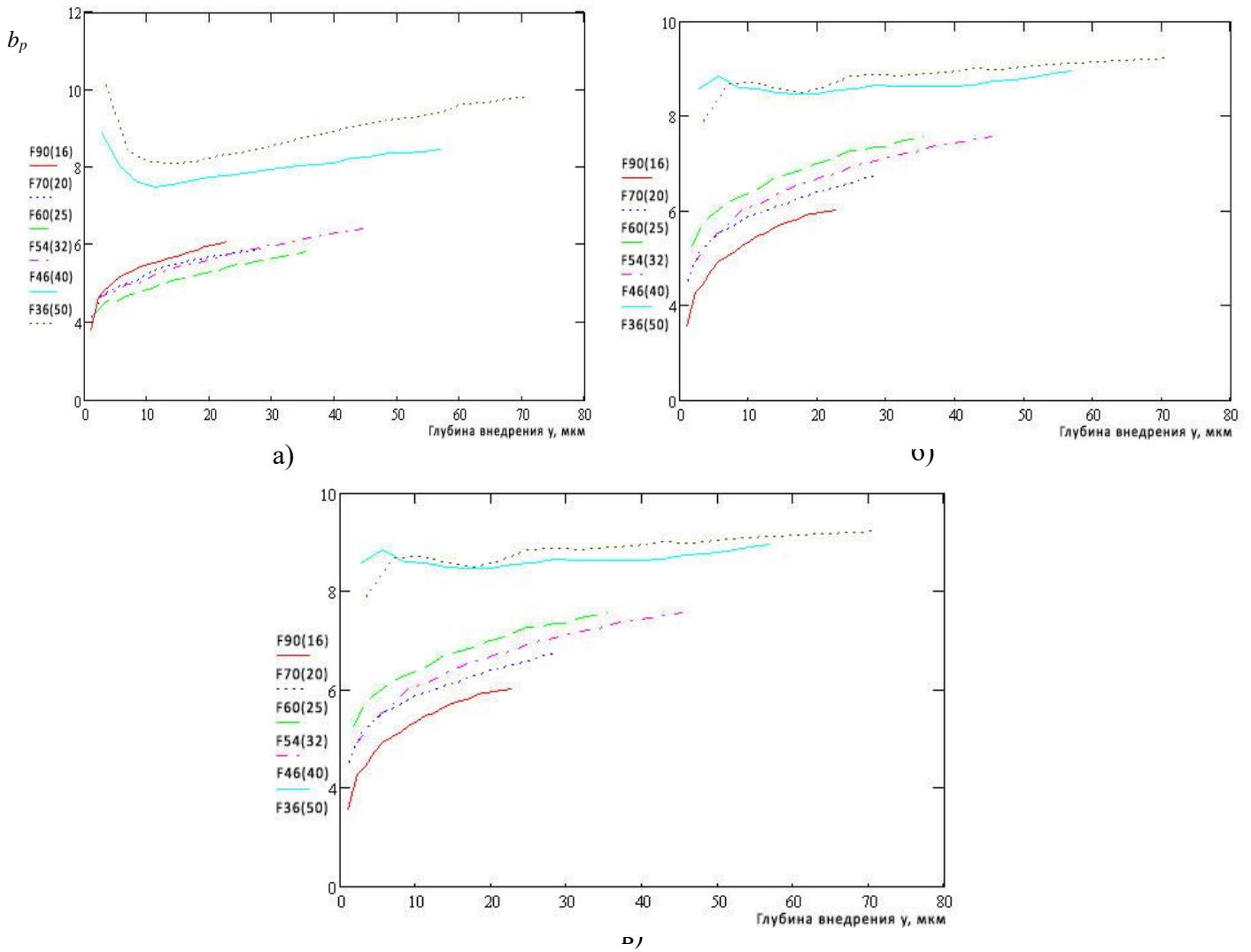


Рис. 3.1.18 – Значения средних параметров  $b_p$  для «режущих» кромок:

а) 53С; б) 63С; в) 92А

Однако и в том, и в другом случае параметр  $\nu_p$  быстро, с уровня  $0,02d_0$ , стабилизируется и составляет в среднем для деформирующих кромок  $\nu_p = 0,9$ , а для режущих кромок  $\nu_p = 0,6$  независимо от зернистости.

Таким образом, режущими кромками являются кромки с более округлой вершиной и меньшими поперечными размерами.

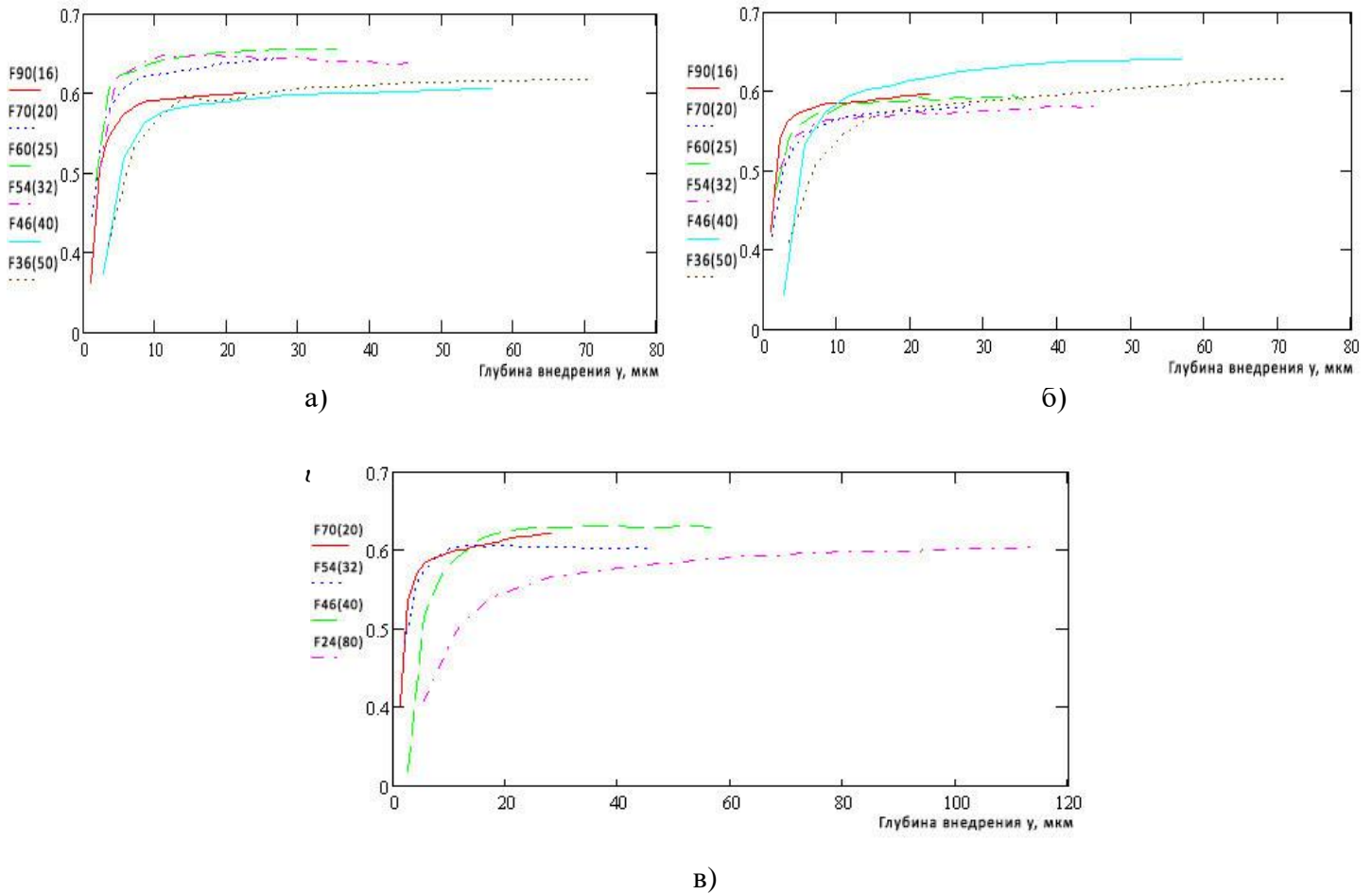


Рис. 3.1.19 – Значения средних параметров  $U_p$  для «режущих» кромок:  
а) 53С; б) 63С; в) 92А

### 3.1.5.5. Анализ результатов эксперимента по радиусу и углу при вершине а.з.

Исследованиями в рамках диссертационной работы установлено, что угол при вершине режущей кромки является недостаточной характеристикой ее режущей способности, поскольку сама режущая кромка может быть наклонена к обрабатываемой поверхности с большим или меньшим передним углом (рис.3.1.20)

Для сравнения результатов исследований геометрических параметров с результатами других исследователей были определены угол при вершине  $\varepsilon$  и радиус вершины  $\rho$  режущей кромки.

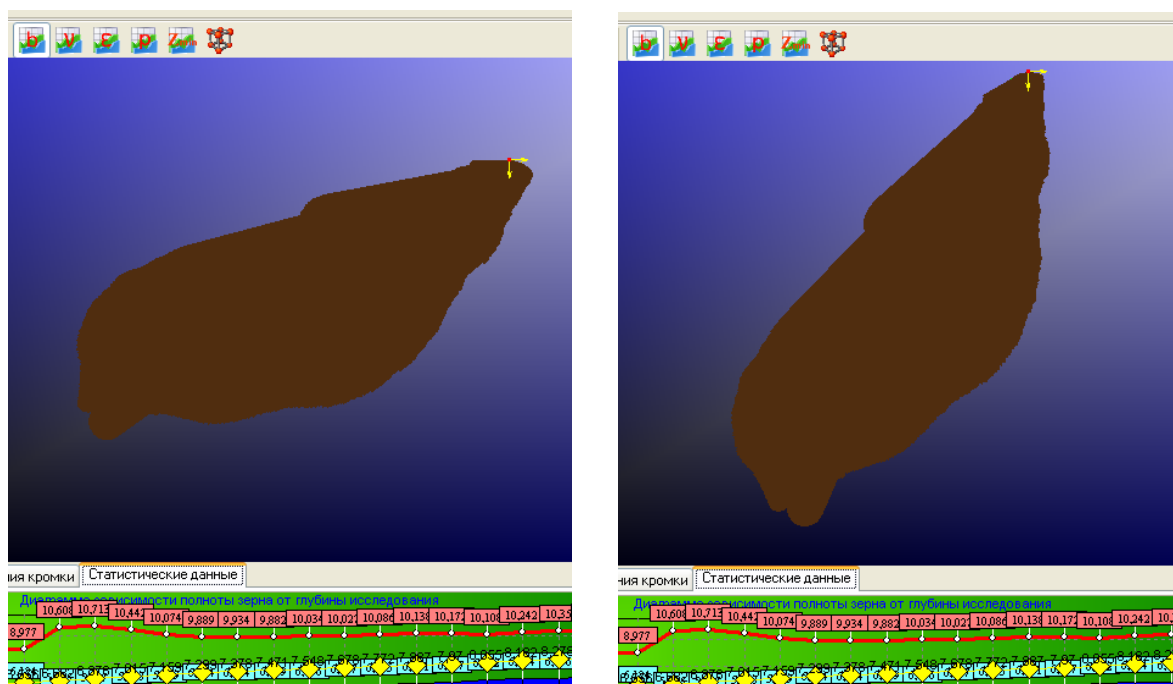


Рис. 3.1.20 – Возможное положение режущей кромки относительно обрабатываемой поверхности:  $\gamma_1 < \gamma_2$  для левой стороны (карбид кремния зеленый 63С,  $K_f = 2,46$ , увеличение -  $\times 17$ , обрабатываемый материал – сталь 19ХГН)

Как видно из анализа рассмотренных рисунков, данные параметры изменяются с глубиной исследования. Эти изменения составляют 25% для угла и 22-27% для радиуса в пределах максимальной рабочей глубины для зерна данной зернистости. Однако если значения угла не зависят от зернистости, то радиус вершины закономерно пропорционален средне вероятному размеру зерна и пропорционален глубине исследования.

При этом значения радиусов колеблются от 5-8 мкм (острые кромки) до 10-70 мкм (плоские кромки). Все исследователи не измеряют плоские кромки, но они также принимают участие в контактном взаимодействии и оставляют после себя шероховатость.

Средние значения этих геометрических параметров для фракций различных материалов и зернистости в зависимости от глубины исследования приведены на рис. 3.1.21 ( $\varepsilon$ ) и на рис. 3.1.22 ( $\rho$ ).

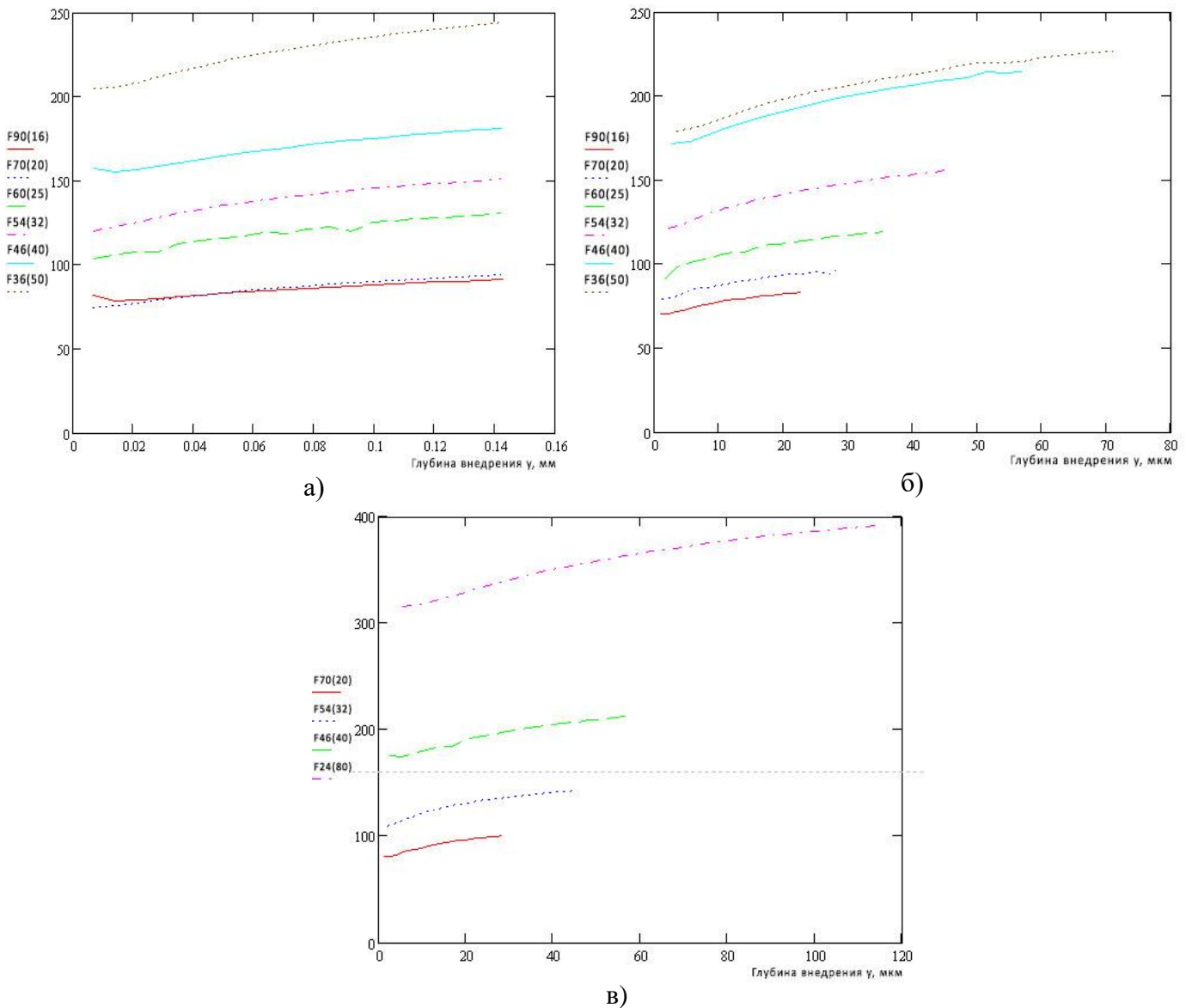


Рис. 3.1.21 – Средние значения угла при вершине кромки  
а) 53С; б) 63С; в) 92А

Однако в теории шлифования при рассмотрении процесса микрорезания принято моделировать режущую кромку конусом с округленной вершиной, для чего существует общеизвестная формула, которая связывает два этих параметра [118]:

$$\rho = \frac{2 \cdot a_z}{\cos^2 \frac{\varepsilon}{2}}. \quad (3.1.6)$$

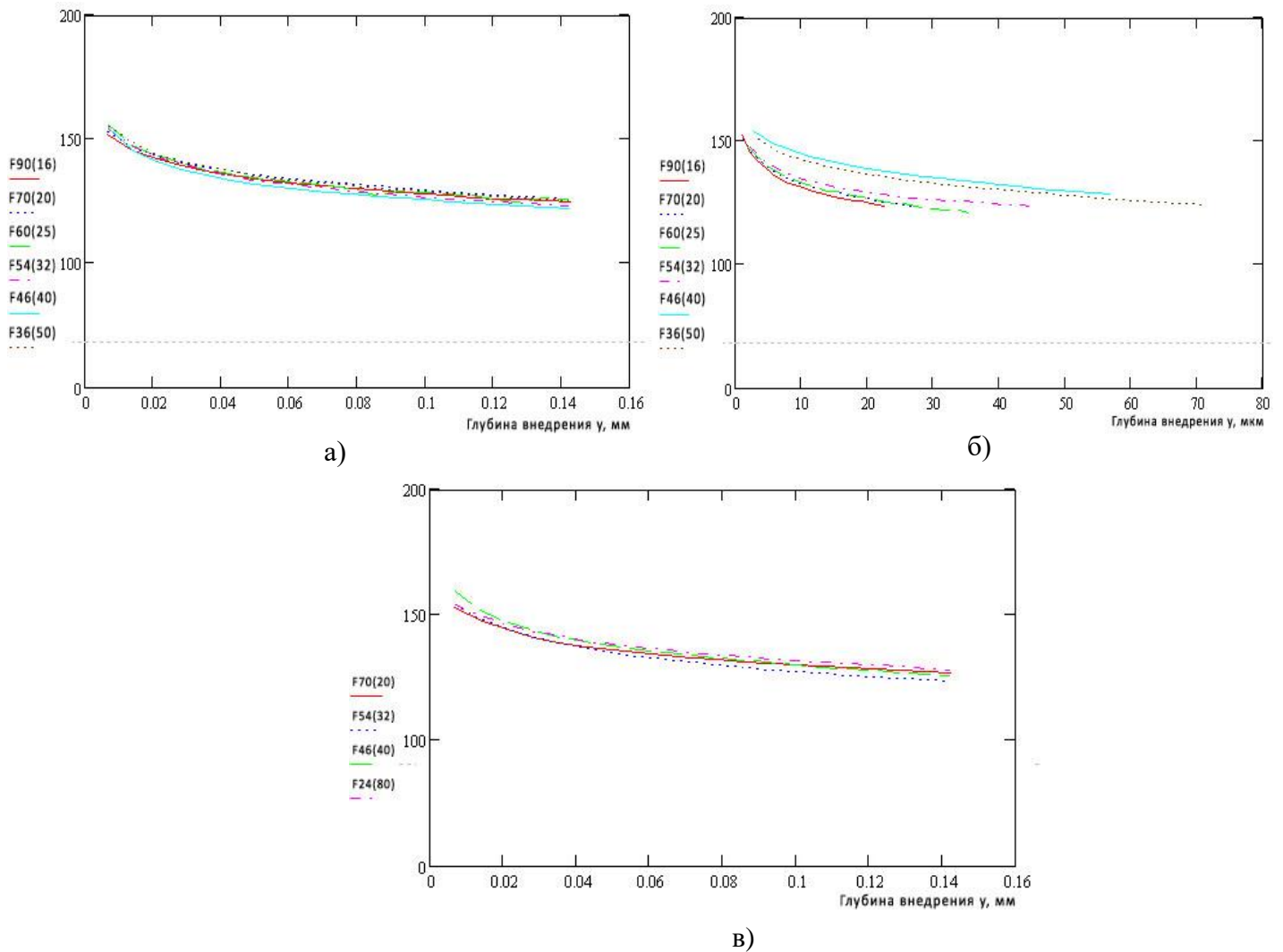


Рис. 3.1.22 – Средние значения радиуса вершины кромки

а) 53С; б) 63С; в) 92А

Анализ формулы показывает, что в этой зависимости не учитывается зернистость абразива. В связи с этим представляют интерес и значения радиуса, рассчитанные по формуле А.В. Королева [126], которые получены на основе измерений множества проекций абразивных зерен.

$$\rho = 0,13 \cdot \frac{d_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\varepsilon_{cp}}{2} \right). \quad (3.1.10)$$

Расчеты по данной формуле дают заниженные результаты по радиусу округления вершины, при этом если учитывать уменьшение угла с глубиной исследования, то и радиус будет уменьшаться, как показывают расчеты, в 2 раза.

Исследованиями установлено, что данные по средним значениям параметров  $\rho$  и  $\varepsilon$ , описывающим традиционную для шлифования модель а.з. в виде конуса с

округленной вершиной, хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований для острых вершин. Этот факт дает основание говорить об адекватности разработанной методики эксперимента.

Анализ результатов эксперимента показал, что  $\rho$  и  $\varepsilon$  – параметры, изменяющиеся по глубине. Поэтому основные геометрические характеристики а.з. целесообразно определять с использованием параметров, которые не меняются от глубины и позволяют моделировать рабочую часть зерна широким спектром фигур, а именно, с использованием  $v_p$  и  $b_p$ .

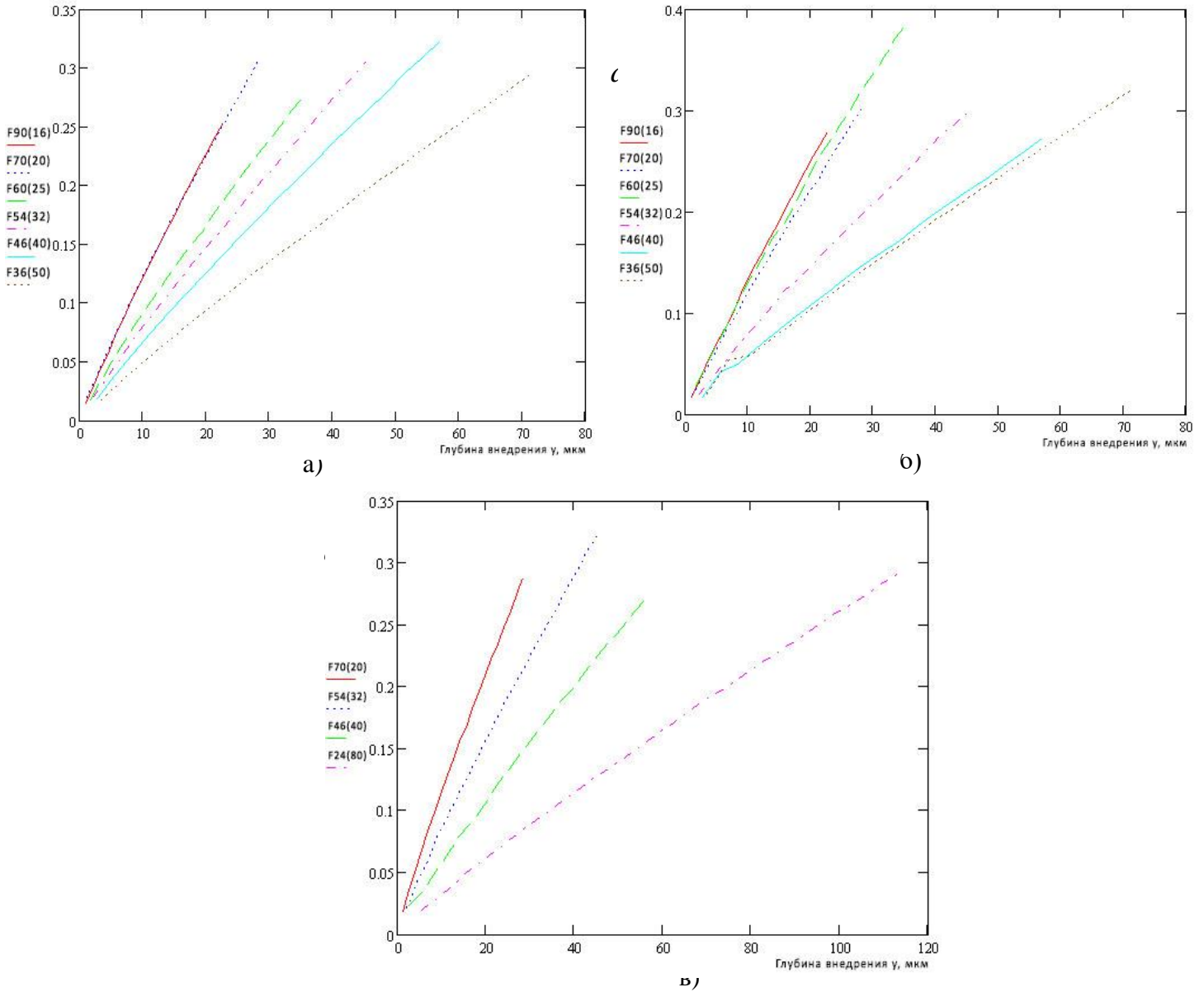
### 3.1.5.6. Анализ результатов эксперимента по определению значения критерия $a_z/\rho$

На основе полученных данных для радиуса закругления вершины были рассчитаны значения критерия  $a_z/\rho$ , которые показывает переход от пластической деформации к возможности отделения стружки.

Средние значения этого отношения для фракций различных материалов и зернистости в зависимости от глубины исследования приведены на рис. 3.1.22

Как видно из графика рис. 3.1.23, значения критерия пропорциональны глубине исследования и зернистости абразивного зерна. Средние значения критерия изменяются от 0 до 0,3, причем при различных значениях критерия существуют как режущие, так и давящие кромки. Согласно геометрическому смыслу этого критерия, чем меньше радиус при заданном внедрении, тем вероятнее образование стружки.

Исходя из полученных результатов по минимальному значению радиуса, вершины режущей кромки в 5-8 мкм независимо от зернистости на уровне 1,1 мкм для F90(16) дает значение  $a_z/\rho = 0,22$ , что согласуется с результатами других исследователей, но если принимать во внимание средний радиус округления вершины, то расчет для тех же условий дает  $a_z/\rho = 0,014$ .

Рис. 3.1.23 – Средние значения критерия  $a_z/\rho$ 

а) 53С; б) 63С; в) 92А

Из этого следует три вывода: либо нельзя использовать средний радиус округления вершины (расчетная глубина стружкообразования оказывается достаточно большой), либо надо пользоваться для расчета минимальным значением радиуса (тогда глубина стружкообразования не будет зависеть от зернистости, что не так), либо необходимо признать, что условия резания для режущих кромок могут быть различными, а следовательно, значения критерия могут также быть различными, что нивелирует ценность критерия.

Если исходить из существующих представлений в теории шлифования о расположении режущей кромки симметрично относительно нормальной оси  $Oy$

( $|\gamma| = \varepsilon/2$ ) и предложенного автором критерия стружкообразования  $90^\circ - |\gamma| \geq \beta_1$ , то для заданного материала пересечение графиков  $\beta_1 = Const$  и  $\varepsilon(y)$  покажет глубину внедрения абразивных режущих кромок, когда начнется микрорезание. Сравнение расчётных данных с результатами эксперимента показывает, что рассчитанные из принятого предположения значения дают существенно более правильные результаты.

Исходя из вышесказанного, необходимо признать, что критерий  $a_z/\rho$  учитывает только форму режущих кромок и не учитывает условий шлифования, марку обрабатываемого материала и является весьма изменчивым параметром, потому что радиус округления зависит от положения режущей кромки относительно обрабатываемой поверхности.

### 3.1.6. Основные выводы

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана и реализована методика определения основных геометрических характеристик абразивного зерна, описанных по традиционной ( $\rho$ ,  $\varepsilon$ ,  $K_\phi$ ,  $a_z/\rho$ ) и по предложенной в диссертационном исследовании математическим моделям ( $b_P$ ,  $\nu_P$ ) структуры шлифовального круга.
2. Разработана и реализована на практике методика определения количества режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента.
3. Определена технология изготовления образцов для проведения экспериментов, позволяющая обеспечить случайность ориентации зерен, свойственную рабочей поверхности реального абразивного инструмента.
4. Подобран математический аппарат для расчета и практического определения количества контактирующих с обрабатываемым металлом зерен, а также процента режущих из них.

5. Обработка результатов эксперимента показала, что количество режущих зерен на 5-7 % выше, чем приводится в работах [105, 106, 116, 127], и зависит от марки абразивного материала.

6. Число режущих зерен прямо пропорционально увеличивается с ростом глубины резания.

7. Сравнение результатов эксперимента по показателям традиционной модели, описывающей форму, размеры и основные геометрические характеристики а.з., с данными других исследователей, говорит об адекватности предложенной технологии их оценки.

### **3.2. Экспериментальное определение реальной штучной плотности абразивного материала**

Основная тенденция развития современного машиностроения – это снижение себестоимости изготовления продукции, прежде всего, за счет автоматизации производственного процесса, применения оборудования с ЧПУ, новых металлорежущих инструментов и универсальной оснастки [128]. Автоматизация средств технологического оснащения механической обработки заготовок путем модернизации позволяет существенно повысить производительность и качество обрабатываемых поверхностей. Но все мероприятия данного направления требуют значительных капиталовложений, поэтому себестоимость механической обработки, как правило, снижается незначительно, и даже в ряде случаев имеет тенденцию к увеличению [129].

До последнего времени шлифование активно использовалось в качестве заключительного этапа обработки закаленных заготовок для достижения требуемого уровня качества поверхности изготавливаемой детали [130]. В настоящее время в связи с широким использованием ультрамелкодисперсного твердосплавного инструмента и современных высокопроизводительных обрабатывающих центров с короткими кинематическими цепями существует распространенное суждение, что процесс шлифования – устаревший способ механической обработки. Однако из-за

низкой стоимости шлифовальных операций, а также широких возможностей использования в условиях применения современных технологий полностью отказаться от данного метода финишной механической обработки не представляется возможным. В связи с этим для повышения конкурентоспособности данного метода механической обработки необходимо его усовершенствование. Одним из путей снижения себестоимости шлифовальной обработки является прогнозирование и контроль конечных результатов параметров качества. Достичь этого можно при условии адекватного моделирования процесса. В связи с этим необходимо, взяв за основу входные данные обработки, определить математические зависимости силовых и температурных характеристик процесса, а также некоторых показателей качества обрабатываемых поверхностей. Исходными данными шлифовальной операции являются технические и размерные характеристики абразивного инструмента, которые существенно влияют на число абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности круга, и, соответственно, на количество режущих кромок, одновременно принимающих участие в процессе резания. Используя соотношение основных элементов шлифовального круга, а именно абразива, связки и пор, можно рассчитать объем каждой составляющей в структуре абразивного инструмента. В литературных источниках имеется информация только по величине объема абразивного материала в круге, что не позволяет определить количество а.з. с режущими кромками, участвующими непосредственно в съеме припуска. Учитывая данную проблему, исследователи [131-133] для определения числа режущих кромок использовали характеристику насыпной плотности, которую определяли экспериментально. Её физический смысл заключается в оценке величины массы абразивного материала в единице объема круга. Значения параметра насыпной плотности у различных исследователей сильно отличаются, что объясняется разной ориентацией зерен сложной формы в пространстве, а также неоднородностью форм и размеров а.з. в рамках одной зернистости абразивного материала.

Воспользуемся термином, который применяют некоторые исследователи для определения количества абразивных зерен в шлифовальном круге и на его ра-

бочей поверхности: вместо насыпной плотности используем понятие штучной плотности. Штучная плотность – это параметр, характеризующий число а.з., находящихся в единице массы абразивного материала. Впервые для определения эксплуатационных характеристик рабочей поверхности шлифовального круга количество зерен в 1 грамме массы использовал Маслов Е.Н. [13]. Носов Н.В. в своих исследованиях по определению количества а.з. в структуре абразивного инструмента [75] также вводит параметр штучной плотности.

Применение параметра «штучная плотность» при построении математической модели процесса шлифования исключает влияние размеров а.з. и их формы на результаты инженерных расчетов, что позволяет более четко определить зависимость температурных, силовых и качественных показателей процесса механической обработки от характеристик шлифовального круга.

В работах Маслова Е.Н. и Носова Н.В. приводятся математические зависимости по определению данного показателя, которые приняты за основу при проведении исследования. Экспериментальной проверки и практического определения параметра штучная плотность авторы не проводили.

Целью нашего исследования является экспериментальное определение параметра реальной штучной плотности различных абразивных материалов и составление по полученным результатам итоговых сводных таблиц для инженерных расчетов параметров структуры шлифовального круга.

На первом этапе работ было проведено изготовление образцов в виде насыпки зёрен абразивного материала на белом листе бумаги (рис. 3.2.1).

К образцам предъявлялись следующие требования:

- расположение зёрен в строго ограниченной области, что существенно упрощает процесс фотографирования;
- равномерное распределение зёрен на образце, что необходимо для удобства их пересчёта и уменьшения погрешности эксперимента;
- число зёрен, используемых в эксперименте, должно обеспечить случайную погрешность исследования не более 5%.

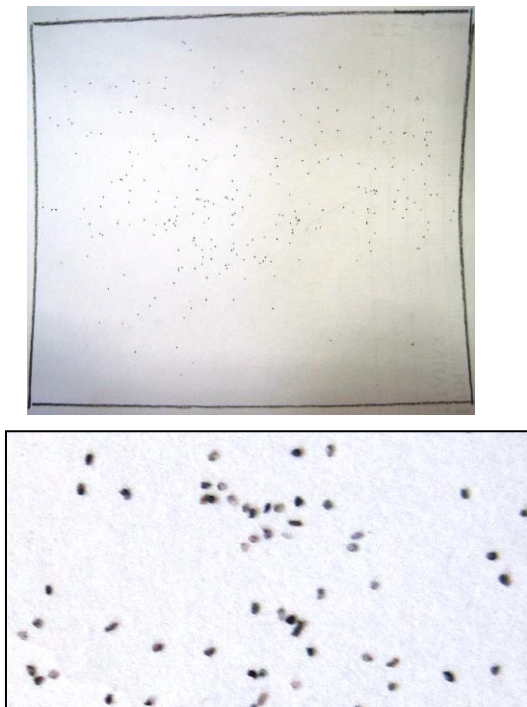


Рис.3.2.1 – Образцы насыпок абразивных зерен

Для выполнения последнего требования к образцу разработана методика оценочного расчёта количества зерен, необходимых для проведения эксперимента с различными абразивными материалами и их зернистостью.

Расчет построен на основе определения количества а.з. в массе абразивного вещества, с учетом величины погрешности измерения цифровых весов.

$$m_{абр} = \delta, \quad (3.2.1)$$

где  $\delta$  – величина погрешности цифровых весов, г.

Масса абразива определяется:

$$m_{абр} = V_{абр} \cdot \rho_{абр}, \quad (3.2.2)$$

где  $V_{абр}$  – объем абразивного материала, мм<sup>3</sup>;

$\rho_{абр}$  – плотность абразива, г/мм<sup>3</sup>.

Объем абразивного вещества ( $V_{абр}$ ) определяется объемом ( $V_{зерн}$ ) и количеством ( $n$ ) абразивных зерен. Объем зерна при моделировании его сферой:

$$V_{абр} = V_{зерн} \cdot n = \frac{4}{3} \pi d_{зерн}^3 n, \quad (3.2.3)$$

где  $d_{зерн}$  – величина диаметра сферы, описывающей абразивное зерно зернистостью ( $N_{зерн}$ ), мм.

$$d_{зерн} = 10,6 N_{зерн} \cdot [134] \quad (3.2.4)$$

В итоге получаем число зерен ( $n_{погр}$ ) в массе абразивного материала, соответствующую значению погрешности цифровых весов:

$$n_{погр} = \frac{\delta}{44,4 \cdot \rho_{абр} \cdot N_{зерн}} \quad (3.2.5)$$

Минимальное число зерен ( $n_{экс}$ ), необходимых для эксперимента с использованием различных абразивных материалов и с разным номером зернистости, рассчитывается из пропорции:

$$n_{погр} = 5\%, n_{экс} = 100\%$$

В результате получим:

$$n_{экс} = \frac{\delta}{2,22 \cdot \rho_{абр} \cdot N_{зерн}} \quad (3.2.6)$$

На следующем этапе эксперимента осуществляли фотографирование полученных образцов с помощью цифрового фотоаппарата Digital IXUS 95 IS. Для каждой марки абразивного материала и различного номера его зернистости было изготовлено по 30 фотографий. Сфотографированные зёрна были объединены в навески для взвешивания по 10 фотографий в каждой.

Пересчет а.з. в эксперименте проводился с помощью программной системы ResFraction [135], интерфейс которой и последовательность процесса подсчёта представлены на рисунке 3.2.2.

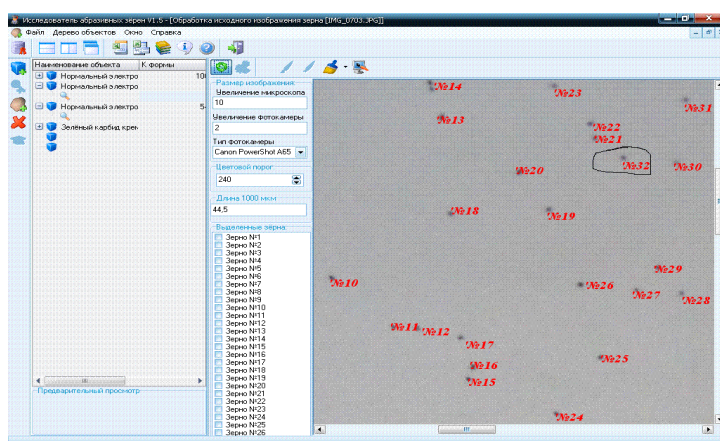


Рис. 3.2.2 – Подсчет зерен в программе ResFraction

Взвешивание образцов проводилось на лабораторных весах серии AND EK-300i, предназначенных для процесса измерения массы различных материалов в научно-исследовательских лабораториях.

По результатам эксперимента полученные данные были сведены в таблицу 3.2.1, содержащую информацию о величине массы образцов и о количестве подсчитанных в них абразивных зерен.

Значения массы образцов и количества в них зерен, представленные в таблице 3.3.1, использовали для расчёта штучной плотности.

Таблица 3.2.1 – Результаты эксперимента для образцов карбида кремния 53С зернистостью F90(16)

Материал	Зернистость	Номер образца	Масса образца	Номер фотографии	Количество зерен
Карбид кремния чёрный 53С	F90(16)	(6-1)	0,07	693	278
				694	498
				695	674
				696	269
				697	226
				698	646
				699	776
				700	836
				701	1307
				702	1629
				Итого	7139
		(6-2)	0,07	703	248
				704	213
				705	261
				706	352
				707	569
				708	849
				709	866
				710	649
				711	798
712	1208				
		Итого	6013		
(6-3)	0,06	713	138		

				714	276
				715	463
				716	676
				717	542
				718	379
				719	362
				720	802
				721	792
				722	651
		Итого	0,2	Итого	5081
				Итого сумма	18233

Значение штучной плотности рассчитывается по математической зависимости:

$$\rho_{шт} = \frac{n_{экс}}{m_{обр}}. \quad (3.2.7)$$

Значения штучной плотности, полученные в рамках проведенных экспериментов, сведены в таблицу 3.2.2.

Таблица 3.2.2 – Сводная таблица расчетных и экспериментальных значений штучной плотности

Зерни- стость	Сред ний раз- мер зерна, см	Объ- ем одно- го зерна, см <sup>3</sup>	Масса одного зерна, г		Кол-во зерен в 1 г		Масса 1600 зерен		Масса 500 зерен		Кол-во зерен в 1 г эксперимент			
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC 63C	SiC 53C	
Зерно- куб														
F150(8)	0,0085	6,10E-07	2,41E-06	1,95E-06	415160	512463	0,004	0,003	0,001	0,001				
F120(10)	0,0106	1,19E-06	4,70E-06	3,81E-06	212562	262381	0,008	0,006	0,002	0,002				
F100(12)	0,0127	2,06E-06	8,13E-06	6,59E-06	123010	151841	0,013	0,011	0,004	0,003				
F90(16)	0,0170	4,88E-06	1,93E-05	1,56E-05	51895	64058	0,031	0,025	0,010	0,008		84350	90856	
F70(20)	0,0212	9,53E-06	3,76E-05	3,05E-05	26570	32798	0,060	0,049	0,019	0,015	37055	37028	43643	

F60(25)	0,0265	1,86E-05	7,35E-05	5,96E-05	13604	16792	0,118	0,095	0,037	0,030		26409	24525
F54(32)	0,0339	3,90E-05	1,54E-04	1,25E-04	6487	8007	0,247	0,200	0,077	0,062	12863	18173	16835
F46(40)	0,0424	7,62E-05	3,01E-04	2,44E-04	3321	4100	0,482	0,390	0,151	0,122	4524	5480	8663
F36(50)	0,0530	1,49E-04	5,88E-04	4,76E-04	1700	2099	0,941	0,762	0,294	0,238		5359	2960
F30(63)	0,0668	2,98E-04	1,18E-03	9,53E-04	850	1049	1,882	1,525	0,588	0,476		1919	2007
F24(80)	0,0848	6,10E-04	2,41E-03	1,95E-03	415	512	3,854	3,122	1,204	0,976	542		
F20(100)	0,1060	1,19E-03	4,70E-03	3,81E-03	213	262	7,527	6,098	2,352	1,906	337		
F16(125)	0,1325	2,33E-03	9,19E-03	7,44E-03	109	134	14,702	11,910	4,594	3,722	157		
Зерно-сфера													
F150(8)	0,0085	3,19E-07	1,26E-06	1,02E-06	792897	978732	0,002	0,002	0,001	0,001			
F120(10)	0,0106	6,24E-07	2,46E-06	2,00E-06	405963	501111	0,004	0,003	0,001	0,001			
F100(12)	0,0127	1,08E-06	4,26E-06	3,45E-06	234932	289995	0,007	0,006	0,002	0,002			
F90(16)	0,0170	2,55E-06	1,01E-05	8,17E-06	99112	122342	0,016	0,013	0,005	0,004		84350	90856
F70(20)	0,0212	4,99E-06	1,97E-05	1,60E-05	50745	62639	0,032	0,026	0,010	0,008	37055	37028	43643
F60(25)	0,0265	9,74E-06	3,85E-05	3,12E-05	25982	32071	0,062	0,050	0,019	0,016		26409	24525
F54(32)	0,0339	2,04E-05	8,07E-05	6,54E-05	12389	15293	0,129	0,105	0,040	0,033	12863	18173	16835
F46(40)	0,0424	3,99E-05	1,58E-04	1,28E-04	6343	7830	0,252	0,204	0,079	0,064	4524	5480	8663
F36(50)	0,0530	7,80E-05	3,08E-04	2,49E-04	3248	4009	0,493	0,399	0,154	0,125			2960
F30(63)	0,0668	1,56E-04	6,16E-04	4,99E-04	1624	2004	0,985	0,798	0,308	0,249		1919	2007
F24(80)	0,0848	3,19E-04	1,26E-03	1,02E-03	793	979	2,018	1,635	0,631	0,511	542		
F20(100)	0,1060	6,24E-04	2,46E-03	2,00E-03	406	501	3,941	3,193	1,232	0,998	337		
F16(125)	0,1325	1,22E-03	4,81E-03	3,90E-03	208	257	7,698	6,236	2,406	1,949	157		

Наряду с экспериментальными результатами в таблице приведены расчётные данные, полученные в процессе построения модели а.з. в форме сферы и куба.

Эксперимент для различных абразивных материалов и их зернистости проводили в несколько этапов, поэтому необходимо обработать полученные значения штучной плотности методами статистического анализа [136].

Результаты эксперимента и данные статистического анализа, полученные в ходе диссертационного исследования, были апробированы и опубликованы [137].

Среднее арифметическое значение штучной плотности рассчитывали по математической зависимости:

$$\bar{\rho}_{um} = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_{um.i}}{k}, \quad (3.2.8)$$

где  $\rho_{um.i}$  – параметр штучной плотности для  $i$ -того эксперимента, шт./г,  
 $k$  – количество экспериментов.

Для оценки распределения результатов произведен расчет значения дисперсии:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (\rho_{um.i} - \bar{\rho}_{um})^2}{k}. \quad (3.2.9)$$

Определим отклонения каждого результата параметра штучной плотности от её среднего значения. С этой целью рассчитаем значение среднего квадратического отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\rho_{um.i} - \bar{\rho}_{um})^2}{k}}. \quad (3.2.10)$$

Определение величины разброса относительных величин осуществляется путем расчета коэффициента вариации:

$$V_{\sigma} = \frac{\sigma}{\rho_{um}} \cdot 100\%. \quad (3.2.11)$$

Результаты статистического расчета были сведены в таблицу 3.2.3.

По значениям штучной плотности, полученным в результате эксперимента, построили графические зависимости расчетных и экспериментальных данных штучной плотности от зернистости абразивного материала для электрокорунда 92А (рис.3.2.5), карбида кремния 63С (рис.3.2.6) и 53С (рис.3.2.7)

Таблица 3.2.3 – Результаты статистического анализа

Материал	Зернистость	Дисперсия	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации
Электрокорунд хромтитанистый легированный 92А	F70(20)	8664904,2	2943,6	7,94%
	F54(32)	7767,2	88,13	0,69%
	F40(40)	25792,7	160,6	3,55%
	F24(80)	75,1	8,7	1,6%
	F20(100)	39,74	6,3	1,87%
	F16(125)	5,6	2,4	1,53%
Карбид кремния 63С	F80(16)	32096420,5	5665,4	6,72%
	F70(20)	17069030	4131,5	11,16%
	F60(25)	5595375,1	2448,5	9,2%
	F54(32)	453062,8	673,1	3,7%
	F40(40)	35370,1	188,1	3,43%
	F36(50)	66188,6	257,3	4,8%

	F30(63)	3742,4	61,2	3,2%
Карбид кремния 53С	F80(16)	64202679,9	8012,7	8,82%
	F70(20)	55820422,33	7471,31	17,1%
	F60(25)	25792,7	160,6	3,55%
	F54(32)	151638	389	2,31%
	F40(40)	72530,2	269,3	3,1%
	F36(50)	8070	89,8	3,03%
	F30(63)	1348,1	36,7	1,83%



Рис.3.2.5 – Графическая зависимость штучной плотности от зернистости электрокорунда хромотитанистого 92А



Рис.3.2.6 – Графическая зависимость штучной плотности от зернистости карбида кремния 63С



Рис.3.2.7 – Графическая зависимость штучной плотности от зернистости карбида кремния 53С

По данным [8], значение штучной плотности для а.з. зернистостью от F100(12) до F46(40) составляет порядка  $10^4 \dots 10^5$  шт./г. Полученные по итогам проведенного эксперимента результаты укладываются в приведенный выше диапазон значений, полученный расчетом по математическим зависимостям.

Значения штучной плотности были использованы для инженерных расчетов количества а.з., находящихся на рабочей поверхности шлифовального круга, а также в его объеме. После анализа результатов, полученных для круга средней пористости, можно рекомендовать для использования на производстве высокопористый (12 структура) абразивный круг 1\* 600\*22\*305 92A F150 O 12 V5. Используя экспериментальные значения штучной плотности, удалось оценить количество абразивных режущих зерен на рабочей поверхности круга, а по модели его внутренней структуры, для одинаковых условий выполнения шлифовальной операции (элементов режим обработки, физико-механических характеристик обрабатываемого материала), доказать эффективность применения высокопористого шлифовального круга, а в дальнейшем подобрать наиболее рациональные режимы обработки.

На основании результатов эксперимента и построенных графических зависимостей сформулированы следующие выводы:

1. Число а.з. в единице массы при увеличении зернистости уменьшается, что связано с ростом их геометрических размеров и подтверждает адекватность результатов эксперимента.

2. Экспериментальные значения штучной плотности находятся в границах диапазона, ограниченного величинами, которые рассчитаны на основании моделирования а.з. кубом и сферой. При этом постоянно сохраняется динамика, при которой параметр штучной плотности больше расчетного её значения по кубу и меньше расчетной величины по сфере.

3. Несовпадение результатов эксперимента с расчетными данными штучной плотности говорит о несовершенстве моделирования зерен различными геометрическими фигурами, не учитывающего реальную неправильную форму а.з.

4. Экспериментальные значения штучной плотности предполагается использовать для инженерных расчетов количества абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности шлифовального круга.

5. Результаты эксперимента позволяют эффективно моделировать силовые, температурные характеристики процесса шлифования, а также параметры качества обработанных поверхностей деталей.

## **Глава 4. Методика и основные результаты экспериментальных исследований процесса шлифования заготовок из цементируемых сталей**

### **4.1. Исследование изменений качественных характеристик поверхностного слоя в зависимости от элементов режима обработки и характеристик шлифовального круга.**

#### **4.1.1. Актуальность и целеполагание исследования эксплуатационных и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей из цементируемых сталей**

Интенсивные изменения характеристик поверхностного слоя, происходящие при шлифовании заготовок, характеризуются высокой силовой и тепловой напряженностью. Процесс шлифования позволяет получить детали высокой точности с малыми высотными параметрами шероховатости, однако вследствие высоких температур при микрорезании в зоне контакта а.з. и поверхности шлифуемой заготовки возможны нежелательные изменения физико-механических параметров поверхностного слоя обработанных деталей.

Известно достаточно большое количество исследований, свидетельствующих о том, что важнейшее влияние на эксплуатационные свойства деталей (усталостная прочность, коррозионная стойкость, износостойкость и т.д.) оказывает, прежде всего, состояние поверхностного слоя детали. Значение данного влияния в большой степени проявляется при производстве и эксплуатации нагруженных узлов и механизмов. Например, к ним в полной мере относится комплект деталей шарнира карданного вала. Эксплуатационные свойства поверхностного слоя крестовины кардана определяют срок службы данного узла, величину нагрузки и крутящего момента, передаваемого через вал на мост автомобиля, а также возможность выдерживать ударные воздействия и сопротивляться негативным факторам агрессивной окружающей среды.

При эксплуатации состояние поверхностного слоя шлифованной поверхности оценивается набором факторов, характеризующих его качество. Основными из этих параметров являются: волнистость, микрогеометрия поверхности (высотные и шаговые характеристики шероховатости); макрогеометрия поверхности шлифованной детали (отклонения формы и расположения поверхностей), физико-механические свойства материала ПС (технологические остаточные напряжения, структурно-фазовый состав, микротвёрдость и т.д.), химический состав материала поверхностного слоя детали и др.

Анализ многочисленных научных публикаций, представленных в 1 главе, показал, что наиболее важными параметрами качества поверхностного слоя, влияющими на эксплуатационные свойства ответственных деталей машин, являются именно физико-механические характеристики этого слоя. Известно, что многие операции технологического процесса изготовления деталей, в том числе и операции шлифования, сопровождаются значительным теплообразованием, что является причиной возникновения структурно-фазовых преобразований и формирования в поверхностном слое заготовки неблагоприятных технологических остаточных напряжений.

Целью данного раздела диссертационного исследования является выявление основных причин изменений качества поверхностного слоя деталей из цементированных сталей, выбор рациональных характеристик абразивного круга и элементов режима резания шлифовальной операции.

#### **4.1.2. Методика экспериментальных исследований оценки остаточных напряжений, фазового состава, волнистости и микротвёрдости шлифованных цементированных заготовок с целью повышения качества их поверхностного слоя**

##### **4.1.2.1. Образцы для проведения исследований**

В качестве шлифуемых заготовок из цементруемых сталей использовали крестовины карданных валов, изготавливаемые на АО «Кардан» (г. Сызрань),

прошедшие перед операцией шлифования токарную и термическую обработку (цементацию на глубину 0,8 ... 1,1 мм и закалку) (рис. 4.1.1.). Материал заготовок – цементированная сталь 19ХГН (HRC 58-62).

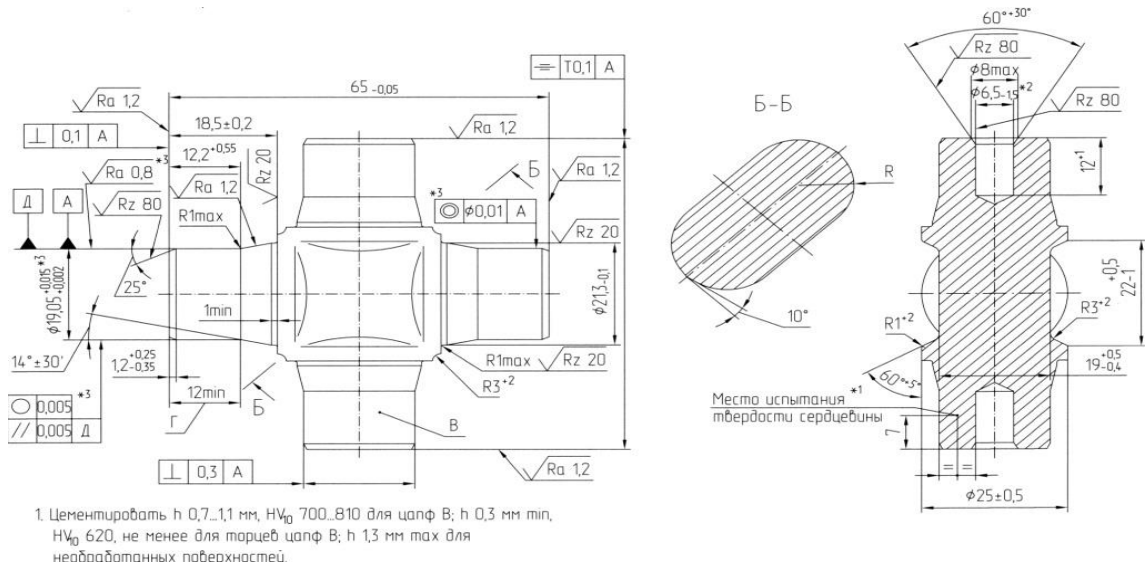


Рис. 4.1.1 – Чертеж заготовок для экспериментов

Технологический процесс цементации включает несколько этапов. Его разработку и контроль проводит технолог термического цеха, который разрабатывает технологические карты и методы контроля качества химико-термической обработки. Газовая цементация крестовины проводится на конвейерном агрегате, в котором имеются 4 зоны: 1) зона – 860-900°C; 2) зона – 890-915°C; 3) зона – 880-910°C; 4) зона 830-860°C. Первая зона функционирует без подачи природного газа, 2,3,4 зоны работают с подачей природного газа, максимальная подача осуществляется во 2 зоне (зоне насыщения) [12].

Полный цикл термообработки составляет около 24 часов и включает в себя несколько этапов:

1. Нагрев деталей до 870°C. На данном этапе ХТО перед цементацией заготовка имеет структуру «феррит + перлит». Феррит – твердый раствор углерода и других элементов в  $\lambda$  - железе. Он содержит до 0,006% углерода. Перлит – эвтектоидная смесь цементита с ферритом.

2. Насыщение поверхности углеродом при температуре 900-930°C.

3. Диффузия углерода вглубь детали при температуре 880-910°C. При нагреве до температуры цементации обрабатываемый металл в диффузионном слое имеет структуру аустенита переменной концентрации от 1,2% до исходного содержания углерода в цементуемой стали. Содержание углерода в поверхностном слое определяется при данной температуре пределом его растворимости в аустените. Чем выше температура цементации, тем больше содержание углерода на поверхности (но не более 2,0%). Аустенит – твердый раствор углерода и других элементов в  $\gamma$  – железе. Он содержит до 2,0 % углерода [138].

4. Подстуживание до температуры закалки – 850°C. Температура зависит от марки стали и нормативных требований по твердости сердцевины. Образование на поверхности насыщенного слоя сплошной зоны, состоящей из карбидов, происходит при цементации на этапе подстуживания деталей перед закалкой, когда снижение температуры происходит без изменения состава атмосферы. Наблюдаемое в этих случаях снижение сопротивления усталости обусловлено прежде всего низкой пластичностью карбидной зоны, а также образованием зоны трехосных напряжений на границе карбидной зоны с мартенситной структурой. При подстуживании заготовка имеет структуру аустенита с разным содержанием углерода у поверхности и в сердцевине.

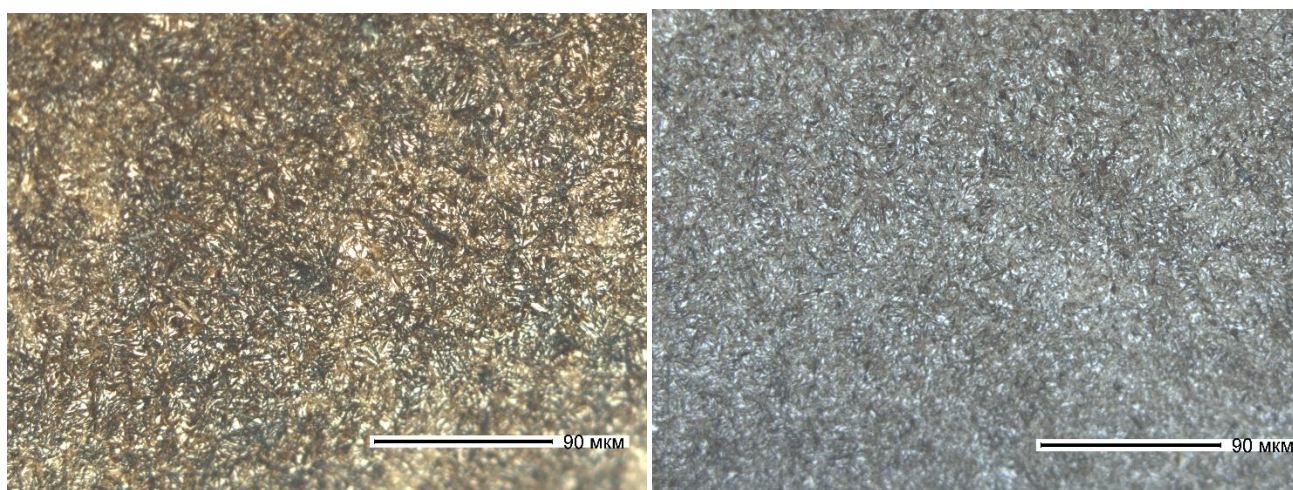
5. Закалка заготовок в горячем масле (130...180°C). После закалки поверхностный слой цементированной заготовки состоит из мартенсита, остаточного аустенита, иногда включений карбидов (цементита) [139]. Переходная зона слоя насыщения имеет структуру игольчатого троостомартенсита, троостита. Сердцевина детали имеет структуру троостосорбита, сорбита, иногда мелкие включения структурно-свободного феррита. На поверхности образуется высокоуглеродистый мартенсит с высокой твердостью и износоустойчивостью, а в сердцевине сохраняется структура с высокой вязкостью. При аустенито- мартенситном превращении происходит только перестройка решетки без изменения концентрации. Превращение является бездиффузионным. Мартенсит в стали есть пересыщенный твердый

раствор углерода в  $\lambda$  – железе с такой же концентрацией, как и у исходного аустенита. Кристаллы мартенсита образуются за чрезвычайно короткий отрезок времени. Состав стали особенно сильно отражается на температурных точках мартенситного превращения. Увеличение содержания углерода приводит к снижению интервала мартенситного превращения. Типичная структура мартенсита закаленной стали имеет характерный игольчатый вид. Аустенит, который существует при нормальной температуре наряду с мартенситом, называется остаточным аустенитом. Количество остаточного аустенита в стали, фиксируемое закалкой, зависит от положения мартенситной точки. Чем ниже мартенситная точка, тем больше остаточного мартенсита. Поэтому углерод, снижая мартенситную точку, увеличивает количество остаточного аустенита. Сердцевина цементированной низкоуглеродистой стали состоит из перлита и феррита. Согласно многочисленным литературным научно-техническим источникам в сердцевине легированной стали образуется малоуглеродистый мартенсит или троостит закалки, троостосорбит закалки, сорбит закалки. В феррито-цементитной смеси (троостит или сорбит закалки), получающейся при распаде аустенита, цементит имеет пластинчатую форму. В получающейся при распаде мартенсита этой же смеси при температуре 400°C и выше цементит имеет зернистую форму. [140] Практически в сердцевине цементованной заготовки имеется структура пластинчатой формы с твердостью, соответствующей трооститу, троостосорбиту и сорбиту.

6. Промывка деталей от масла.

7. Низкий отпуск (190-210 °C). Повышение температуры отпуска приведет к снижению твердости и изменению внутренней структуры материала детали, что негативно скажется на эксплуатационных свойствах крестовины карданного вала. После низкого отпуска структура стали не меняется, но в технологических целях в дальнейшей терминологии используется термин мартенсит отпуска, хотя визуально при исследованиях на металлографическом микроскопе он не имеет отличий [138]. Микроструктура поверхностной зоны слоя насыщения должна представлять собой мелкоигольчатый (рис. 4.1.2, б) и среднеигольчатый вид (рис.

4.1.2, а) мартенсита, а также остаточный аустенит в количестве 10-30% при обеспечении необходимой твердости поверхности. Причем особенно важно получить оптимальную структуру во внешней зоне слоя, так как она подвергается наибольшим эксплуатационным нагрузкам при работе деталей на изгиб, высоким контактными напряжениями, эта поверхность определяет сопротивление детали схватыванию и изнашиванию.



а)

б)

Рис. 4.1.2 – Рентгенограммы микроструктуры поверхностного слоя цементированной стали 19ХГН, содержащий:  
а) среднеигльчатый мартенсит; б) мелкоигльчатый мартенсит

Продолжительность процесса рассчитывается, исходя из нормативной глубины цементованного слоя, указанной на рабочем чертеже детали. На оборудовании устанавливается определенный темп перемещения заготовок.

При проведении низкого отпуска получается микроструктура поверхностного слоя, состоящая из мартенсита, остаточного аустенита и карбидов при пересыщении углеродом, что свойственно для цементированных сталей. Микроструктура поверхностной зоны слоя насыщения должна представлять собой мелкоигльчатый и среднеигльчатый мартенсит и остаточный аустенит в количестве 10-30% при обеспечении необходимой твердости поверхности. При максимальном содержании мартенсита и минимальной доли остаточного аустенита твердость поверхностного слоя будет получаться максимальной. Причем особенно важно получить оптимальную

структуру во внешней зоне слоя, так как она подвергается наибольшим эксплуатационным нагрузкам при работе деталей на изгиб, высоким контактными напряжениями. Эта поверхность определяет сопротивление детали схватыванию и изнашиванию.

При термической обработке низким отпуском легированной цементированной стали существует точка температур начала мартенситного превращения и точка окончания мартенситного превращения. Для того чтобы весь аустенит превратился в мартенсит необходимо охладить сталь ниже температуры окончания мартенситного превращения. Если процесс низкого отпуска остановить в середине интервала температур между точками начала и окончания мартенситного превращения, то в структуре поверхностного слоя заготовки останется остаточный аустенит. Количество остаточного аустенита очень чувствительно к содержанию легирующих элементов. В связи с этим одна из сложностей термической обработки легированных сталей в сравнении с термообработкой углеродистых сталей заключается в проблеме спрогнозировать и обеспечить на практике процентное содержание остаточного аустенита, который остается в структуре материала. Этот показатель сильно зависит от содержания углерода в стали. Чем больше углерода, тем ниже точка окончания мартенситного превращения. Соответственно, чем более насыщена сталь углеродом, тем она более склонна к сохранению в своей структуре остаточного аустенита. Если, например, закалить сталь У8 и сталь 20 в одинаковых условиях, то там, где много углерода (в инструментальной стали), остаточного аустенита будет существенно больше [141].

Увеличение процентного содержания остаточного аустенита в структуре поверхностного слоя цементированной закаленной легированной стали способствует увеличению пластичности и приводит к снижению твердости материала, что в значительной степени ухудшает эксплуатационные свойства детали.

Наличие остаточного аустенита в поверхностном слое обрабатываемой заготовки негативно сказывается и на процессе бесцентрового шлифования шеек крестовины карданного вала. Мгновенная температура в зоне контакта

абразивного зерна с металлом достигает 1500 °С. Остаточный аустенит по сравнению с мартенситом обладает повышенной пластичностью. При высоких температурах это свойство еще более усиливается. В процессе обработки заготовки шлифованием происходит налипание элементов обрабатываемого материала на микронеровности зерна шлифовального круга, что ухудшает отвод элементов стружки из зоны резания и приводит к засаливанию рабочей поверхности абразивного инструмента. В связи с этим существует необходимость в управлении количеством остаточного аустенита в поверхностном слое стали для максимального снижения его концентрации в структуре кристаллической решетки металла.

Наличие в мартенситно-аустенитной структуре слоя мелких включений карбидов увеличивает износостойкость слоя без снижения вязкости разрушения, сопротивления усталости и является не только допустимым, но и желательным фактором.

На операцию шлифования заготовки поступают после химико-термической обработки (ХТО). При ХТО происходят три процесса:

Диссоциация – протекает в газовой среде при высокой температуре и заключается в распаде молекул и образовании активных атомов диффундирующего элемента (углерода при цементации). При этом образуются активные атомы углерода, способные растворяться в металле, степень распада молекул газа (%) называется степенью диссоциации.

Абсорбция – происходит на границе газ - металл и состоит в поглощении (растворении) поверхностью заготовки свободных атомов, Этот процесс возможен только в том случае, если диффундирующий элемент способен растворяться в основном металле.

Диффузия – проникновение насыщающего элемента (углерода) вглубь металла. В результате образуется диффузионный слой, на поверхности которого концентрация диффундирующего элемента наибольшая, по мере удаления от поверхности концентрация падает, глубина проникновения будет представлять собой толщину цементированного слоя. Этими процессами достигается выгодное

распределение углерода по сечению поверхностного слоя заготовки. Цементацию рекомендуется проводить так, чтобы содержание углерода на поверхности не превышало 1,1...1,2%. Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительного количества вторичного цементита, сообщающего поверхностному слою повышенную хрупкость. Содержание углерода постепенно уменьшается от поверхности в глубину изделия. Окончательно свойства цементированной заготовки формирует последующая закалка, при которой на поверхности образуется высокоуглеродистый мартенсит, а в сердцевине сохраняются высокая вязкость и низкая твердость. Цементированные заготовки после закалки для снятия внутренних напряжений подвергают отпуску при низкой температуре (190 – 210 °С). [142]

Количество остаточного аустенита часто бывает связано с размером игл мартенсита. Чем крупнее мартенсит, тем больше остаточного аустенита в поверхностном слое цементированной заготовки. Оценку качества цементованного слоя по количеству остаточного аустенита и по наличию избыточных карбидов проводят с помощью эталонных шкал по существующим на АО «Кардан» методикам и нормам контроля.

Заготовки после ХТО должны иметь высокую поверхностную твердость и сравнительно мягкую сердцевину для исключения хрупкого разрушения при эксплуатации.

#### **4.1.2.2. Критерии оценки качества поверхностного слоя деталей**

Для оценки качества поверхностного слоя цементированных деталей использовали перечисленные ниже критерии:

1. Шероховатость шлифованной поверхности, оцениваемая следующими параметрами [143]:

- высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$ , мкм;
- среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ , мкм;
- наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$ , мкм.

## 2. Волнистость поверхности.

Разграничение неровностей на волнистость и шероховатость носит условный характер. Критерием разграничения является отношение длины шага к высоте неровности  $l/H$ . Для волнистости  $l/H = 51 \dots 1000$ , а для шероховатости  $l/H = 0 \dots 50$ . Допуск на волнистость назначается на максимальную высоту волны на длине измерения не менее 10 мм. Поэтому волнистость поверхности определяется теми же параметрами, что и шероховатость.

## 3. Микротвердость поверхностного слоя шлифованной детали.

Микротвердость определяется в соответствии с ГОСТ 9450-76 по следующей зависимости:

$$HV = F/S, \quad (4.1.1)$$

где  $F$  – действующая на индентор твердомера нагрузка, Н

$S$  – площадь поверхности отпечатка индентора в материале исследуемого образца,  $\text{мм}^2$ .

## 4. Фазовый состав поверхностного слоя шлифованной детали

В процессе количественного микроанализа происходит определение основных структурных и фазовых составляющих металла детали, их количества и морфологии. При проведении количественного микроанализа, выполняемого как непосредственно с использованием металлографического микроскопа, так и по фотографиям микроструктуры, применяются увеличения от 100 до 1000. Для экспресс-оценки фазового состава и структуры используют эталонные шкалы, приведенные в соответствующих ГОСТах. Стандартные шкалы позволяют методом сравнения оценить структурный и фазовый состав образцов в баллах и сертифицировать металл по объемному содержанию его составляющих, их размерам, характеру распределения и другим параметрам [144]. Сравнительный анализ проводится с использованием основной шкалы [145] – соотношение мартенсита и остаточного аустенита, так как именно эти составляющие фазового состава закаленной цементированной стали оказывают значительное влияние на эксплуата-

ционные свойства. Оценка структуры мартенсита проводится методом сравнения ее с эталонами шкалы №3 ГОСТ 8233-56 с помощью металлографического микроскопа при увеличении 1000. Допустимой структурой является мартенсит 1...6 балла шкалы. Не допускается наличие крупноигольчатого и грубоигольчатого мартенсита 7...10 балла шкала 3 ГОСТ 8233-56 [139].

5. Величина остаточных напряжений:

$$\sigma_i = m\varepsilon_i^n, \quad (4.1.2)$$

где  $\varepsilon_i$  и  $\sigma_i$  – интенсивности деформации и напряжения, Па,  $n$  и  $m$  – постоянные коэффициенты для конкретного материала;  $m$  – значение напряжения течения (напряжения, превышающего предел текучести) при логарифмической деформации  $\varepsilon_1$ , равной единице,  $\varepsilon_1 = \ln(l/l_0) = 1$ ,  $l_0$  и  $l$  – исходная и конечная длины образца [146],  $n$  – показатель деформационного упрочнения металла.

#### **4.1.2.3. Параметры, контролируемые при исследованиях. Методы и средства измерения**

Измерения параметров качества поверхностного слоя шлифованных деталей из цементируемых сталей осуществляли в научно-исследовательской лаборатории Регионального технологического центра промышленного интернета Ульяновского государственного технического университета.

Отшлифованные на различных режимах образцы исследовались на экспериментальных установках, применяемых для оценки критериев качества их поверхностного слоя. С целью определения конкретных параметров заготовок использовались различные методы и средства измерения:

##### **1. Шероховатость и волнистость шлифованной детали.**

Среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности  $Ra$ , а также длину волн, образовавшихся на ней, измеряли на профилометре мод. 130 (рисунок 4.1.3).

Профилометр модели 130 используется для измерения в производственных условиях шероховатости поверхности деталей, сечение которых в измеряемой плоскости представлено прямой линией. Конструкция профилометра состоит из индуктивного датчика с алмазной иглой и опорой на контролируемую поверхность, закрепленного в электромеханическом приводе, с помощью которого он имеет возможность перемещения по горизонтальной поверхности детали.

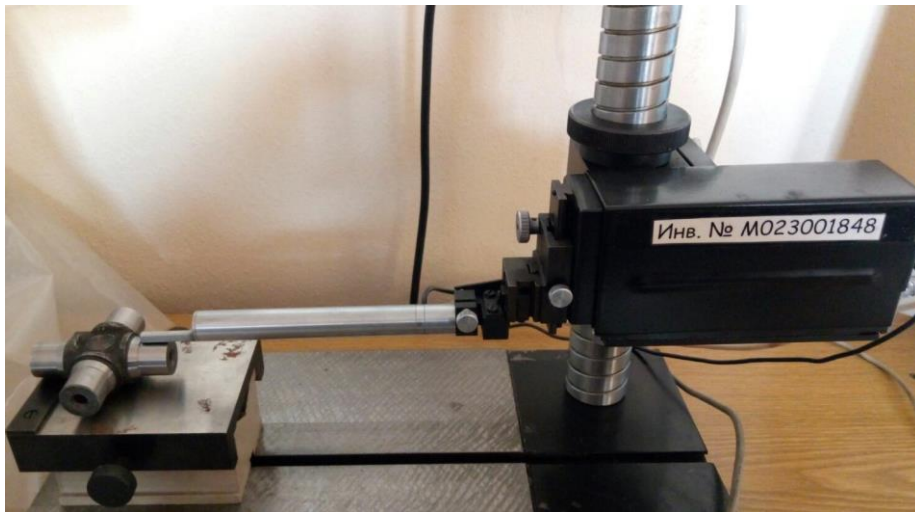


Рис. 4.1.3 – Профилометр модели 130

В вертикальной плоскости для осуществления контакта датчика с исследуемым профилем привод перемещается по колонне, установленной на плите, на которой расположена измеряемая деталь.

Принцип работы профилометра основывается на считывании алмазной иглой неровностей измеряемой поверхности в процессе её движения вдоль исследуемого профиля и последующим преобразованием возникших при этом механических колебаний иглы индуктивным датчиком в измеряемый электрический сигнал.

Технические параметры профилометра модели 130.

Диапазон измерений:

параметров  $R_p$  и  $R_v$ , мкм 0,025 – 125;

параметров  $R_a$  и  $R_q$ , мкм 0,012 – 50;

параметров  $R_z$  и  $R_{max}$ , мкм 0,05 – 250;

параметра  $L_0$ , мкм 100 – 100 000;

параметров  $S_m, S, \lambda_a, \lambda_q$ , мкм 10 – 1600;

параметра  $t_p$ , % 1 – 100.

Предел допустимой основной погрешности  $\Delta$  для профиля, близкого к цилиндрическому, с шагом неровностей, не превышающим  $0,25 \lambda_b$ :

при измерении параметров  $Rz, R_{max}, R_p, R_v$  и  $R_q$ :  $\Delta = 0,03\Pi + 0,05И$ ;

при измерении параметра  $Ra$ :  $\Delta = 0,02\Pi + 0,04И$ ;

при измерении параметров  $S_m, S, \lambda_a, \lambda_q$ :  $\Delta = 0,02\Pi + 0,10И$ ;

при измерении параметра  $t_p$ :  $\Delta = 0,08\Pi + 0,02И$ ,

где И – действительная (измеренная) величина соответствующего измеряемого параметра;

$\Pi$  – верхняя граница предела поддиапазона измерений данного параметра.

Параметры шероховатости рассчитываются в соответствии с ГОСТ 2789-73 на выбранной базовой длине. С этой целью в профилометре предусматривается фильтрация исследуемого профиля: низкочастотным фильтром с «волной среза снизу» – отсечкой шага  $\lambda_b$  и высокочастотным фильтром с «волной среза сверху» –  $\lambda_s$ , аналогичными по действию аппаратным фильтрам устранения помех и наводок в электрических системах. Выбор значения отсечки  $\lambda_b$  означает, что исследуемый профиль, являющийся совокупностью неровностей с разным шагом, фильтруется так, чтобы параметры шероховатости определяются на базовой длине, равной величине шага отсечки.

2. Мартенсит в процессе шлифования может превращаться в остаточный аустенит под действием силы давления абразивного инструмента, интенсивности выбранных режимов шлифования и высоких мгновенных высоких температур (порядка 1000 – 1500 °С, иногда достигающих температуры плавления металла [13]), которые в очень короткий период времени образуются в поверхностном цементированном слое заготовки в зоне контакта ее с абразивной режущей кромкой (до 60% остаточного аустенита при шлифовании цементированных и закаленных сталей) [170, 171].

Ключевой вопрос, который возникает перед исследователями: успеет ли в зоне контакта абразивного инструмента и обрабатываемого материала развиваться необходимая кинетика процесса фазовых превращений, т.е. хватит ли времени воздействия температур для прохождения обратного преобразования мартенсита в остаточный аустенит? Учитывая понятие об эффекте «термического циклирования» в аустенитно-мартенситном слое стали [163], формирование остаточного аустенита (в качественном и количественном эквиваленте) при шлифовании главным образом будет зависеть от скорости мгновенного нагрева (при температуре 1000°C и выше) и малости времени аустенизации. При этом вследствие серьезного искажения кристаллической металлической решетки и кратковременности протекающего структурно-фазового процесса мартенситное превращение в поверхностном слое стальной заготовки по причине эффекта «вторичной закалки» при шлифовании будет протекать не полностью, что приведет к сохранению частичной аустенитной структуры [170, 171]. В случае бездиффузионного превращения мартенсита в аустенит образование перлитной структуры невозможно по причине быстро протекаемого фазового процесса, поскольку для образования последней требуется гораздо больше времени [171]. Однако, несмотря на уже подтвержденные факты, научные исследования в области структурно-фазовых превращений при абразивной обработке предварительно термообработанных сталей имеют актуальную направленность, т.к. влияние широкого спектра факторов (величины мгновенной температуры, возникающего контактного давления, режимов шлифования, особенностей микроструктуры поверхностного слоя, времени температурного влияния и других) на переходный процесс мартенсита в остаточный аустенит до конца не изучено.

В связи с этим в рамках данного этапа диссертационной работы стоит задача оценить процентное содержание остаточного аустенита в поверхностном слое заготовки после шлифовальной операции в зависимости от режимов резания, при помощи которых обработка осуществлялась.

Фазовое состояние металла поверхностного слоя (ПС) обработанных образцов исследовали с помощью рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7» с использованием медного катода (рисунок 4.1.4).

При необходимости образец очищали от окалины и окислов на машине для изготовления микрошлифов, обеспечивая параметр микрогеометрии его поверхности  $Ra = 1,6$  мкм для уменьшения фоновых шумов, после чего образец устанавливали на предметный столик прибора.



Рисунок 4.1.4. – Конструкция рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»

1 – гониометрический узел; 2 – рентгеновская трубка; 3 – компьютер; 4 – детектор;  
5 – вычислительный блок; 6 – исследуемая деталь

После установки образца выставляли наклон рентгеновской трубки в зависимости от материала (ниже приведен пример для  $\gamma$ - и  $\alpha$ -железа). Соотношение  $\alpha$ -железа и  $\gamma$ -железа в объеме поверхностного слоя (ПС) регулировалось настройкой трубки медного катода на угол дифракции  $2 \cdot \Theta \approx 44^\circ$ . Это позволяет достичь максимальной интенсивности пиков мартенсита ( $\lambda$  – железо,  $2 \cdot \Theta \approx 44,5^\circ$ ) и аустенита ( $\gamma$ -железо,  $2 \cdot \Theta \approx 43,5^\circ$ ), что позволяет использовать величины интенсивностей их пиков для расчёта соотношения объемов этих фаз.

Значения параметров с детектора передавались на персональный компьютер и обсчитывались программой MD-10, поставленной вместе с измерительным

комплексом «Рикор-7» его разработчиками, после чего определялась экспозиция значений стандартного угла дифракции  $2 \cdot \Theta$  по горизонтальной оси и интенсивности пиков  $I$  в вертикальной плоскости.

Перед проведением исследования рентгеновскую трубку прогревали до заданных параметров: напряжение = 25,0 кВ, ток = 200,0 мА, мощность = 5,0 Вт.

В программе измерений открывали вкладку «Калибровка». Ориентируясь на данные калибровки «Тарировка по меди», вводили значения углов  $2 \cdot \Theta$  и канал, сохраняя настройки калибровки. Открывали вкладку в программе «Измерение» и настраивали время экспозиции 600 секунд. Нажимали «Старт измерения», а после истечения времени экспозиции запускали функцию программы – «Обработка спектра». Для лучшего отображения выбирали сглаживание спектра по 5 точкам. Показания при исследовании фазового состава двухфазной стали на дифрактометре «Рикор-7» представлены на рисунке 4.1.5.

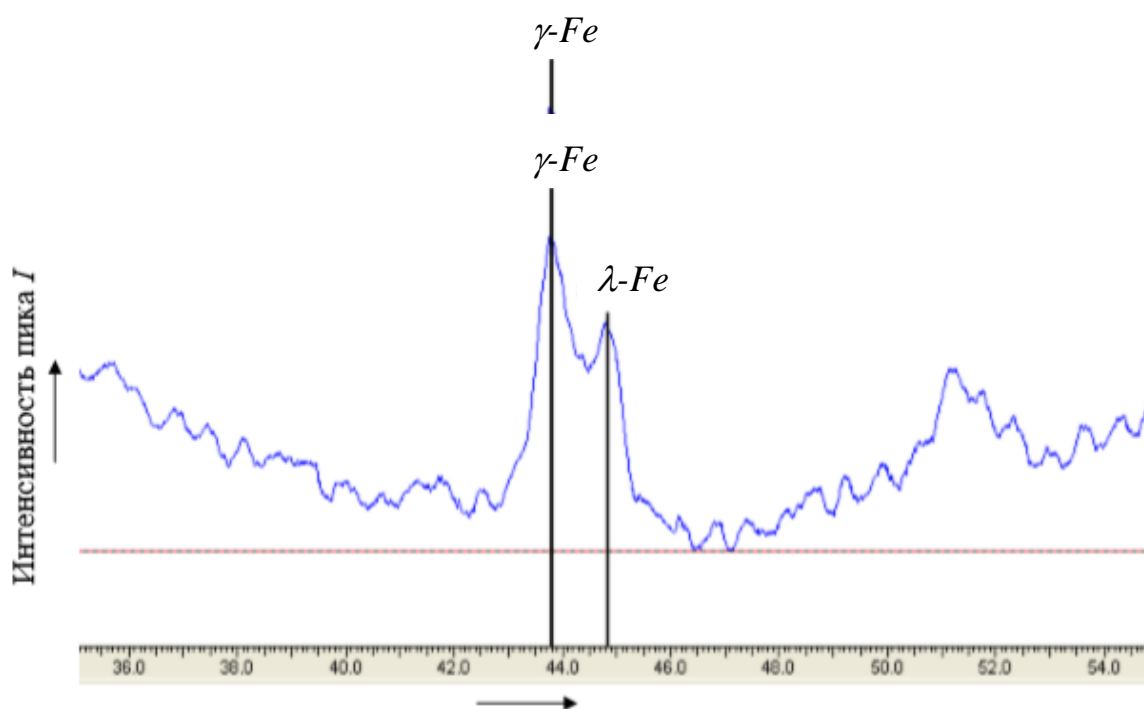


Рисунок 4.1.5 – Показания рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»

Фиксируется значение выбранных пиков кнопкой «Добавить пик», после чего программа автоматически выдает соответствующую интенсивность для данного пика ( $I_{max}$ ).

Количественное соотношение фаз определялось по формуле:

$$K = \frac{I_{\max \gamma-Fe}}{I_{\max \lambda-Fe}},$$

где  $I_{\max \gamma-Fe}$ ,  $I_{\max \lambda-Fe}$  – интенсивности пиков, соответствующих аустениту ( $\gamma$ -железо) и мартенситу ( $\lambda$  – железо).

3. Технологические остаточные напряжения третьего рода измеряли рентгенографическим способом, который базируется на явлении определения линейного размера кристаллической решетки металла под действием нагрузки. При возникновении в исследуемом образце механических напряжений длина ребер элементарного куба меняется с ориентировкой ребра соответственно с упругими деформациями материала. При падении рентгеновских лучей на образец наблюдается интерференция лучей, рассеиваемых в кристаллической решетке металла.

Этот метод является «прямым» неразрушающим методом контроля остаточных напряжений рентгеновским способом, принципиальная схема которого представлена на рисунке 4.1.6.



Рисунок 4.1.6 – Принципиальная схема устройства рентгеновского измерительного комплекса

Данный метод основан на оценке величины деформации кристаллической решетки материала. Для измерения использовали рентгеновский измерительный

комплекс оценки остаточных напряжений неразрушающим методом "РИКОР-4" (рис. 4.1.7).

Данный метод основан на оценке величины деформации кристаллической решетки материала. Для измерения использовали рентгеновский измерительный комплекс оценки остаточных напряжений "РИКОР-4" неразрушающим методом (рис. 4.1.7).

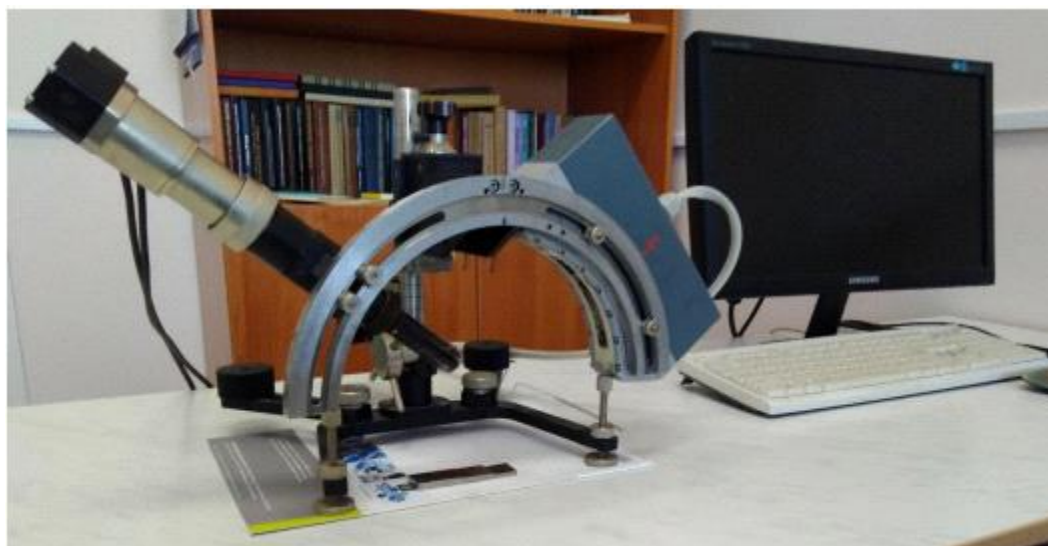


Рис. 4.1.7 – Рентгеновский измерительный комплекс для оценки неразрушающим методом остаточных напряжений "РИКОР-4"

4. Определение микротвердости шлифованной поверхности осуществляли по Виккерсу, так как технические требования на рабочем чертеже крестовины шарнира карданного вала назначены именно по данной шкале. Суть метода заключается в том, что алмазный наконечник, имеющий форму правильной четырехгранной пирамиды с углом  $\alpha$  между противоположными гранями при вершине, вдавливается в исследуемую поверхность образца под действием нагрузки (статической силы)  $F$ .

Схема приложения нагрузки представлена на рисунке 4.1.8. Нагрузка прикладывается перпендикулярно к поверхности испытуемого образца. После снятия нагрузки измеряют длины диагоналей отпечатка  $d_1$  и  $d_2$  [147].

Твердость по Виккерсу определяется как частное от деления нагрузки на площадь боковой поверхности отпечатка на образце.

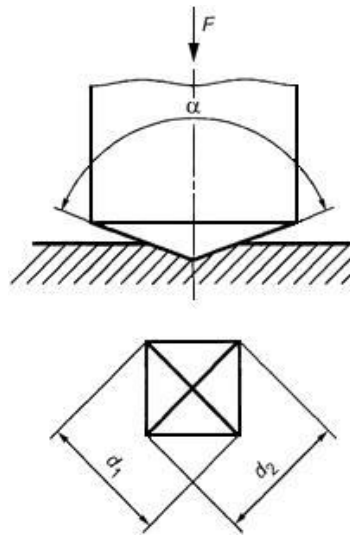


Рис. 4.1.8 – Схема приложения нагрузки

Площадь боковой поверхности рассчитывается по длинам диагоналей, принимая, что отпечаток имеет форму правильной пирамиды, основание которой представлено в виде квадрата, и с углом при вершине, равным углу вершины у наконечника (таблица 4.1.1).

Число твердости по Виккерсу  $HV$  определялась по математической зависимости:

$$HV = k \frac{F}{d^2}, \quad (4.1.3)$$

где  $k = 0,1891$  – постоянная;  $F$  – нагрузка, прикладываемая в процессе измерения, Н;  $d$  – среднеарифметическое значение длин диагоналей  $d_1$  и  $d_2$ , мм.

Микротвердость поверхностного слоя исследуемого образца измеряли с использованием микротвердомера Tukon 1102/12/02 фирмы Wilson Hardness (рисунок 4.1.9).

Таблица 4.1.1 – Параметры, используемые при определении величины микротвердости

Обозначение	Определение
$\alpha$	Угол между противоположными гранями на вершине наконечника ( $136^\circ$ ) в виде правильной четырехгранной пирамиды
$F$	Нагрузка (статическая сила), примененная в процессе измерения, Н
$D$	Среднеарифметическое значение двух длин диагоналей (рис. 4.2.6), мм

<i>HV</i>	<p>Твердость по Виккерсу=Константа×<math>\frac{\text{Испытательная нагрузка}}{\text{Площадь боковой поверхности отпечатка}} =</math></p> $= 0,102 \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}$
Примечание - Константа	$= \frac{1}{g_n} = \frac{1}{9,80665} \approx 0,102$ <p>где <math>g_n = 9,80665</math> – ускорение свободного падения.</p>

От цилиндрической поверхности заготовки на электроэрозионном станке отрезали сегмент под углом  $10^\circ$  к образующей цилиндрической поверхности заготовки. Сегмент заливали протакрилом (рисунок 4.1.10.). Замеры производили в пяти точках, расположенных друг относительно друга на расстоянии 1,25 мм в плоскости, по которой выполнен разрез заготовки.



Рис. 4.1.9. Микротвердомер Tukon 1102/12/02

Точка №1 располагалась на расстоянии 1,25 мм от края заготовки, совпадающем с ее наружной цилиндрической поверхностью. Расстояние от наружной цилиндрической поверхности до первой точки, в которой замеряли микротвердость и расстояние между точками в направлении, перпендикулярном

образующей цилиндрической поверхности заготовки, рассчитывали по зависимости  $x = 1,25 \cdot \operatorname{tg} 10^\circ$ .

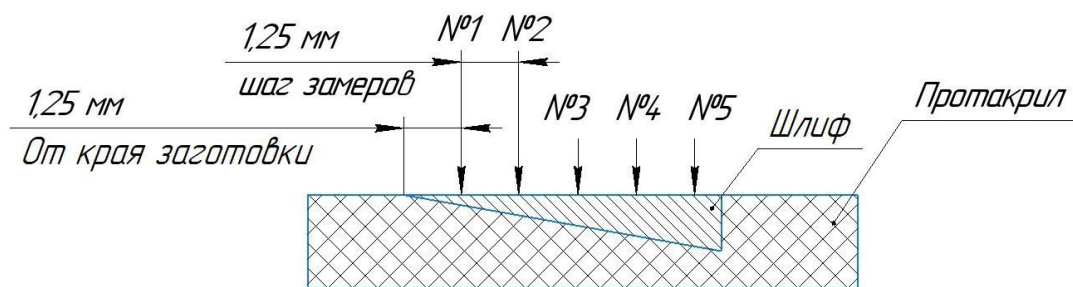


Рисунок 4.1.10 – Схема расположения точек, в которых производили измерение микротвердости

#### 4.1.2.4. Технические требования к шлифовальным кругам и инструменту правки

При выборе абразивного инструмента для проведения эксперимента ориентировались на характеристики кругов, применяемых на предприятиях автомобильной промышленности при шлифовании заготовок деталей из цементированных легированных сталей. На операциях бесцентрового шлифования шеек шипов крестовины карданных валов в условиях АО «Автокомпонент» (г. Ульяновск) и АО «Кардан» (г. Сызрань) используется круг типа 1\* 600\*22\*305 со следующими характеристиками: 92A F150 O 8 V5, где:

92A – обозначение марки абразивного материала (хромотитанистый легированный электрокорунд). Хромотитанистый электрокорунд изготавливают плавкой глинозема в электрической дуговой печи с добавлением легирующих компонентов (титана и оксидов хрома). Легирование двумя компонентами создает возможность улучшить абразивные свойства материала. Шлифовальные материалы из хромотитанистого электрокорунда благодаря своим высоким абразивным свойствам и механической прочности вытеснили на ряде ответственных операций абразивной обработки шлифовальные материалы из хромистого электрокорунда [148].

*F150* – обозначена зернистость абразивного материала (размер зерна 80 и 100 мкм соответственно), повышенного индекса зернистости. Однородность зернового состава, оказывающая существенное влияние на шероховатость шлифованной поверхности, режущие свойства и стойкость инструмента, определяется процентным содержанием основной фракции. В связи с этим условное обозначение зернистости дополняют буквенным индексом, соответствующим данному процентному содержанию.

*O* – обозначение степени твердости круга. Твердость круга средняя.

8 – номер структуры. Соответствует содержанию 46% абразивного материала. 15% связки для индекса твердости *C1* и 18% связки для индекса твердости *O*. Оставшаяся доля структуры круга относится на поры.

*V5* – обозначение марок керамической связки.

При исследованиях использовали круги *92A F150 O 8 V5*, а также круги, имеющие такую же характеристику и номера структуры 12 и 16, т. е. варьировали номером структуры круга [148]. Правка абразивного круга при врезном шлифовании шеек крестовин карданных валов осуществляется с периодичностью через каждые шесть деталей на рабочем режиме при скорости его главного движения  $V_k = 42,7$  м/с и со врезной подачей –  $V_s = 0,8$  мм/мин.

В качестве инструмента для правки применяется специализированный фасонный алмазный ролик, спроектированный в АО «ВНИИАЛМАЗ» (г. Москва). Маркировка его УК 2994.10 осуществлена в соответствии с ГОСТ 16014-78 и включает: товарный знак предприятия-изготовителя; условное обозначение ролика; порядковый номер ролика по системе нумерации предприятия-изготовителя. Данный инструмент позволяет на шлифовальном круге получить профиль рабочей поверхности круга, которая одновременно производит шлифование как наружной цилиндрической поверхности шейки крестовины, так и фаски на ней.

#### 4.1.2.5. Смазочно-охлаждающие жидкости и техника их применения

В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовалась универсальная биостабильная полусинтетическая смазочно-охлаждающая жидкость «Coolant» концентрации 2...3% из очищенных базовых масел, образующая полупрозрачные микроэмульсии. Химический состав и физико-механические свойства применяемой СОЖ приведены в таблице 4.1.2.

Добавка высокоэффективных ингибиторов коррозии, эмульгаторов и пакета функциональных присадок создает сбалансированные характеристики продукта и длительный срок его службы.

Приготовление СОЖ осуществлялось смешиванием специального концентрата с водой в определенной концентрации в зависимости от вида технологической операции.

Таблица 4.1.2 – Химический состав СОЖ «Coolant» [181]

Компоненты (наименование)	Массо- вая доля, %	Гигиенические нормативы в воздухе рабочей зоны		№ CAS	№ EC
		ПДК р.з., мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности		
Минеральные масла	23,4	5 (аэрозоль)	3	74869-22-0	278-012-2
Олеиновая кислота	14,8	5 (аэрозоль)	3	112-80-1	204-007-1
2-Аминоэтанол+	13,8	0,5 (пары+аэрозоль)	2	141-43-5	205-483-3
Ди-(2- гидрокси- этил)амин+	11,3	5 (пары+аэрозоль)	3	111-42-2	203-868-0
Борная кислота	7,4	10 (аэрозоль)	3	10043-35-3	233-139-2
Этиленгликоль	3,1	10/5 (па- ры+аэрозоль)	3	107-21-1	203-473-3
Диэтиленгликоль	1,2	10(пары+аэрозоль)	3	111-46-6	203-872-2
Вода	24,6	Не установлена	Нет	7732-18-5	231-791-2

#### 4.1.2.6. Режимы шлифования

В рамках лабораторных исследований и производственного процесса на АО «Автокомпонент» (г. Ульяновск) и АО «Кардан» (г. Сызрань) заготовки из цементированных сталей шлифуют с рабочей скоростью круга  $V_k = 42,7$  м/с и врезной подачей –  $V_s = 2$  мм/мин. Время выхаживания  $\tau$  составляет 3 секунды. Диаметр заготовки до шлифовальной операции –  $\varnothing 19,33 \pm 0,1$  мм. Диаметр отшлифованной поверхности  $\varnothing 19,065_{-0,013}$  мм. Припуск на шлифовальную операцию составляет 0,1325 мм. При реализации многофакторного эксперимента с целью оценки качественных характеристик поверхностного слоя шлифованных поверхностей использовали следующие элементы режима [149]: рабочая скорость абразивного круга  $V_k = 50$  м/с; скорость врезной подачи  $V_s = 2,5$  и 1,5 мм/мин; время выхаживания  $\tau = 5$  и 1 с. Снимаемый припуск – 0,13 мм.

#### 4.1.3. Математическое планирование экспериментов, состав и количество опытов

Номенклатура АК для проведения исследований технологической эффективности шлифования торцом круга.

Таблица 4.1.3 – Перечень шлифовальных кругов, применяемых в экспериментальном исследовании

Обозначение	Типоразмер	Абразив	Зернистость	Номер структуры
К1	1* 600*22*305	91А	F150(8)	12
К2				14
К3				16

2. Состав и количество опытов сведен в таблицу 4.1.4.

Таблица 4.1.4 – Перечень опытов

№ серии опытов	Скорость врезной подачи $V_S$ , мм/мин	Время выхаживания $\tau$ , с	Номер структуры круга $N_{стр}$	Критерии оценки
1	1,5	1	8	Структурно-фазовый состав (С); остаточные напряжения 3-го рода (ТЗ); параметр $Ra$ шероховатости; средняя высота волн $W$
2	2,5	5	8	
3	1,5	5	8	
4	2,5	1	8	
5	1,5	1	16	
6	2,5	5	16	
7	1,5	5	16	
8	2,5	1	16	
9	1,5	1	12	
10	2,5	5	12	
11	1,5	5	12	
12	2,5	1	12	

#### 4.1.4. Обработка результатов исследований и их статистический анализ

Требуемое число параллельных опытов определили по формуле [150]:

$$N = \frac{n}{K}, \quad (4.1.4)$$

где  $n$  – требуемое число измерений;  $K$  – число измерений при проведении одного опыта.

Требуемое число измерений  $n$  определяли по математической зависимости

$$n = \frac{S^2(Y_i) \cdot t_{p(m-1)}^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{2m} \pm \frac{2}{\sqrt{2m}}\right)}{I_p^2}, \quad (4.1.5)$$

где  $S^2(Y_i)$  – дисперсия определяемого параметра;  $t_{p(m-1)}$  – величина коэффициента Стьюдента для вероятности  $p$  при числе замеров  $m$ ;  $I_p$  – задаваемое

с вероятностью  $p$  максимальное допустимое отклонение среднего значения от истинного;  $m$  – число замеров в предварительном эксперименте.

Результаты оценки по зависимостям (4.1.5) и (4.1.6) показали, что в рамках исследования необходимо провести три параллельных опыта.

Метрологический расчёт критериев эффективности проводили по методике РДМУ 109 – 77 [150].

Абсолютную погрешность измерения  $\Delta Y_i$  критериев, оцененных по результатам прямых измерений, определили, суммируя случайные и систематические погрешности измерения [151]:

$$\Delta Y_i = \sqrt{t_p^2 \cdot \sigma_{Y_i}^2 + \Delta_{Y_{ic}}^2}, \quad (4.1.6)$$

где  $\Delta_{Y_{ic}}$  – систематическая погрешность измерения;  $\sigma_{Y_i}$  – средняя квадратическая погрешность измерения;  $t_p \cdot \sigma_{Y_i}$  – случайная погрешность измерения.

Относительные погрешности измерения рассчитывали по математической зависимости:

$$\delta_{Y_i} = \pm \frac{\Delta Y_i}{Y_i}. \quad (4.1.7)$$

Абсолютные погрешности измерения критериев, оцененные по результатам косвенных измерений, определяли следующим образом:

$$\Delta y_i = \sum_j \frac{\partial Y}{\partial Y_j} \cdot \Delta Y_j, \quad (4.1.8)$$

где  $Y_j$  – параметр, определенный по результатам прямого измерения.

Для оценки достоверности результатов исследования и выявления их аномальных значений рассчитали статистический критерий [152]:

$$Q_3 = \frac{Y_n^* - Y_{n-1}}{Y_n^* - Y_1}, \quad (4.1.9)$$

где  $Y_n^*$  – аномальная величина результата исследования;  $Y_n^* - Y_1$  – разность между значениями кратных членов вариационного ряда;  $Y_{n-1}$  – значение результата, соседнего с  $Y_n^*$  в вариационном ряду.

Если значение  $Q_3$  превысило табличное  $Q_T$  для конкретной величины доверительной вероятности  $p$ , то результат  $Y_n^*$  считался аномальным.

Обработку и анализ результатов полного многофакторного эксперимента типа ПФЭ  $2^3$  (этапы исследований № 2 и 3) производили в соответствии с РДМУ 109-77 [153].

1. Рассчитали среднюю величину параметра по результатам проведения параллельных опытов для каждой строки (точки) плана эксперимента:

$$\bar{Y}_v = \frac{\sum_{j=1}^m Y_{v,j}}{m}, \quad (4.1.10)$$

где  $m$  – число параллельных опытов в каждой точке плана эксперимента;  $j$  – номер параллельного опыта;  $v$  – номер точки плана матрицы;  $Y_{v,j}$  – величина параметра оптимизации в  $j$ -ом параллельном опыте в  $v$ -ой точке плана эксперимента.

2. Рассчитали выборочную дисперсию воспроизводимости параллельных опытов для каждой точки плана матрицы:

$$S_v^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (\bar{Y}_v - Y_{v,j})^2}{n-1}. \quad (4.1.11)$$

3. Однородность дисперсий определили, оценив критерий Кохрена и сравнив его с табличным значением:

$$G = \frac{S_{v_{max}}^2}{\sum_{v=1}^N S_v^2}, \quad (4.1.12)$$

где  $S_{v_{max}}^2$  – максимальная из рассчитанных значений дисперсии.

4. Дисперсию воспроизводимости  $S^2(Y)$  рассчитали как среднюю арифметическую дисперсий:

$$S^2(Y) = \frac{\sum_{v=1}^N S_v^2}{N} \dots\dots\dots (4.1.13)$$

5. Коэффициенты регрессии определили по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{v=1}^N X_{iv} \cdot \bar{Y}_v}{N}, \quad (4.1.14)$$

где  $X_{iv}$  – значение фактора (+1 или -1) в соответствующей ячейке матрицы планирования.

6. Дисперсию ошибки расчёта коэффициента регрессии оценили с помощью математической зависимости:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2(Y)}{N \cdot m}. \quad (4.1.15)$$

7. Для анализа значимости коэффициентов регрессии для каждого его значения определили критерий Стьюдента и сравнили его с табличным  $t_{кр}$ :

$$t_i = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}} \quad (4.1.16)$$

Если  $t_i > t_{кр}$ , то соответствующий коэффициент признавался значимым.

В математическую модель процесса шлифования крестовин шеек карданного вала включали исключительно значимые коэффициенты регрессии.

8. Для анализа адекватности разработанной модели эксперимента определили дисперсии адекватности по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{N - \ell} \cdot \left( \bar{Y}_v - \hat{Y}_{v,A} \right), \quad (4.1.17)$$

где  $\ell$  – число значимых коэффициентов регрессии, включая  $b_0$ ;  $\hat{Y}_{v,A}$  – значение оптимизации для каждой точки плана матрицы эксперимента, рассчитанное по уравнению регрессии.

9. Адекватность модели проверили по результатам определения критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{a\partial}^2}{S^2\{Y\}}. \quad (4.1.18)$$

Гипотезу адекватности модели эксперимента принимали, когда расчетное значение  $F$  получалось меньше табличного.

#### 4.1.5. Результаты измерений параметров качества поверхностного слоя заготовок

В таблице 4.1.5 представлены усредненные результаты, полученные при реализации всех трех серий параллельных экспериментов:

Таблица 4.1.5 – Средние значения результатов, полученных в параллельных экспериментах

№ серии опытов	Скорость врезной подачи $V_s$ , мм/мин	Время выхаживания $\tau$ , с	Номер структуры круга $N_{cmp}$	Содержание остаточного аустенита в поверхностном слое (%)	Остаточные напряжения III рода $T_3$ , МПа	Параметр шероховатости $Ra$ , мкм	Средняя высота волн $W$ , мкм
1	1,5	1	8	13,06	121	0,79	0,57
2	2,5	5	8	13,89	169	0,73	0,52
3	1,5	5	8	13,47	159,3	0,87	0,66
4	2,5	1	8	12,66	109,7	0,81	0,595
5	1,5	1	16	13,94	130	0,98	0,75
6	2,5	5	16	15,24	180,7	0,84	0,633
7	1,5	5	16	14,63	173	1,06	0,865
8	2,5	1	16	13,56	123,7	0,93	0,7
9	1,5	1	12	12,8	157	0,92	0,58
10	2,5	5	12	11,9	109	0,8	0,64
11	1,5	5	12	12,45	146	0,95	0,75
12	2,5	1	12	11,23	97	0,78	0,62

Минимальные значения остаточных напряжений 3-го рода получены при скорости подачи  $V_S = 2,5$  мм/мин и времени выхаживания  $\tau = 1$ с – 97 МПа при шлифовании кругом 12-й структуры; 123,7 МПа при шлифовании кругом 16-й структуры и 127 МПа – при обработке кругом 8-й структуры. Максимальные значения остаточных напряжений 3-го рода зафиксированы при  $V_S = 2,5$  мм/мин и  $\tau = 5$ с – 169 и 180,7 МПа при шлифовании кругом 8-й и 16-й структуры соответственно. Это можно объяснить более высокой контактной температурой заготовки и большим периодом действия теплового источника при больших значениях  $V_S$  и  $\tau$ .

При шлифовании кругом 16-й структуры остаточные напряжения 3-го рода в среднем на 9% выше, чем при шлифовании кругом 8-й структуры. Это может быть связано с меньшим количеством а.з. на рабочей поверхности круга 16-й структуры. С уменьшением количества зерен увеличиваются глубина внедрения их в заготовку и контактные температуры в зоне шлифования.

Минимальное количество остаточного аустенита (11,23; 12,66; 13,56% при шлифовании кругом 12, 8 и 16-й структуры соответственно) получено при значениях скорости врезной подачи  $V_S = 2,5$  мм/мин и времени выхаживания  $t = 1$ с; максимальное (13,89 и 15,24% при шлифовании кругом 8 и 16-й структуры соответственно) – при максимальных значениях  $V_S = 1,5$  мм/мин и времени выхаживания  $t = 5$  с. При шлифовании кругом 16-й структуры содержание остаточного аустенита выше, чем при шлифовании кругом 8-й структуры (в среднем на 8%).

По-видимому, это объясняется увеличением контактной температуры в поверхностном слое заготовки в связи с увеличением времени действия теплового источника с увеличением времени выхаживания и увеличением мгновенной температуры в зоне касания абразивного зерна с обрабатываемого материала.

Параметр  $Ra$  шероховатости и средняя высота волн  $W$  шлифованной поверхности снижаются с уменьшением  $V_S$  и увеличиваются с уменьшением значения времени выхаживания  $\tau$ . При шлифовании кругом 16-й структуры значения параметров  $Ra$  и  $W$  на 19 и 25% выше, чем при шлифовании кругом 8-й

структуры, что может быть связано с большим значением глубин внедрения зерен круга 16-й структуры в заготовку.

Ниже представлены уравнения регрессии, полученные после обработки результатов полного многофакторного эксперимента.

$$C = 11,36 + 0,8 \cdot V_S + 0,06 \cdot N_{cmp};$$

$$T3 = 22,33 + 53,83 \cdot V_S + 5,33 \cdot \tau + 3,28 \cdot N_{cmp};$$

$$Ra = 0,74 + 0,063 \cdot V_S - 0,02 \cdot \tau + 0,0049 \cdot N_{cmp};$$

$$W = 0,51 + 0,069 \cdot V_S - 0,014 \cdot \tau.$$

В уравнении для расчета параметра  $C$  значимыми являются два коэффициента – при параметрах  $V_S$  и  $N_{cmp}$ . Оба этих коэффициента являются положительными, следовательно, с увеличением скорости подачи и номера структуры количество остаточного цементита увеличивается. Коэффициент при параметре  $\tau$  является незначимым, что свидетельствует о незначительном влиянии времени выхаживания на содержание остаточного цементита.

В уравнении для расчета остаточных напряжений 3-го рода значимыми оказались коэффициенты перед каждым из параметров –  $V_S$ ,  $\tau$ ,  $N_{cmp}$ . Все эти коэффициенты положительны. Следовательно, с увеличением  $V_S$ ,  $\tau$  и  $N_{cmp}$  значения остаточных напряжений увеличиваются.

В уравнении для расчета среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  положительное значение имеют коэффициенты при параметрах  $V_S$  и  $N_{cmp}$ , поэтому при увеличении этих параметров значение  $Ra$  увеличивается. Коэффициент регрессии при параметре  $\tau$  имеет знак минус, что свидетельствует о снижении значения  $Ra$  при увеличении времени выхаживания.

Уравнение регрессии для расчета параметра волнистости  $W$  содержит лишь два значимых коэффициента, причем коэффициент при параметре  $V_S$  является положительным, а при параметре  $\tau$  – отрицательным.

При взаимодействующих факторах не оказался значимым ни один коэффициент регрессии во всех уравнениях.

Минимальные значения количества остаточного аустенита (11,23%) и остаточных напряжений 3-го рода, (97 МПа) шероховатости и волнистости

получены при шлифовании кругом 12-й структуры на режиме: рабочая скорость шлифовального круга  $V = 50$  м/с; скорость врезной подачи  $V_S = 2,5$  мм/мин; время выхаживания  $\tau = 1$  с; номер структуры круга  $N_{cmp} = 12$ . При увеличении номера структуры круга увеличивается расстояние между зернами, материал заготовки остывает большее время, поэтому температура в ее поверхностных слоях снижается. Однако увеличивается глубина внедрения зерен в материал заготовки и увеличиваются локальные температуры. Очевидно, при обработке кругом 12-й зернистости формируется температурное поле, позволяющее получить минимальные значения остаточного аустенита и напряжений 3-го рода. [150]

Минимальные значения количества остаточного аустенита, остаточных напряжений 3-го рода, шероховатости и волнистости получены на режиме: рабочая скорость шлифовального круга  $V = 50$  м/с; скорость врезной подачи  $V_S = 2,5$  мм/мин; время выхаживания  $\tau = 1$  с; номер структуры круга  $N_{cmp} = 12$ . Оценим величину микротвердости поверхности крестовины, обработанной именно по данной технологии.

Увеличивая рабочую скорость шлифования с 42,7 до 50 м/с, уменьшая время выхаживания с 3 до 1 секунды, а также увеличивая номер структуры круга с 8 до 12, уменьшаем количество абразивных зерен, воздействующих на единицу площади обрабатываемого материала. Всеми этими решениями сокращается время контакта абразивного зерна с материалом, а соответственно уменьшается длительность воздействия температур, значение которых в зоне контакта зерна с обрабатываемым материалом при увеличении номера структуры возрастают, на участок поверхностного слоя заготовки. Тем самым вышеуказанные изменения технологического процесса шлифования крестовины карданного вала способствуют тому, что мартенсит, образовавшийся в материале поверхностного слоя после закалки, не успевает превращаться в аустенит и обработанная поверхность остается более твердая. Данный факт подтверждается исследованиями, проведенными автором, результаты которых приведены в таблице 4.1.5.

Чем выше процентное содержание остаточного аустенита в поверхностном слое цементированной заготовки, который не до конца преобразовался в мартенсит в процессе закалки, а также сформировался при обратном превращении из мартенсита на шлифовальной операции, тем ниже качество обработанной поверхности по показателю микротвердости и хуже протекает обработка шлифованием, так как аустенит является достаточно пластичным элементом структуры цементированной легированной стали. Все это способствует быстрому засаливанию шлифовального круга и требует включения в операцию шлифования более частой правки абразивного инструмента (через каждые 6 деталей). В связи с этим стоит задача максимального снижения процентного содержания остаточного аустенита в поверхностном слое закаленной цементированной стали крестовины карданного вала.

Выполненные исследования позволили подобрать максимально рациональный режим обработки по показателю наименьшего процентного содержания остаточного аустенита, а именно 11,23 %.

Результаты измерения микротвердости заготовок, прошлифованных на вышеприведенном режиме и по технологии, действующей на АО «Кардан» (г. Сызрань) ( $V_k = 42,7$  м/с,  $V_S = 2$  мм/мин,  $\tau = 3$  с, номер структуры круга  $N_{cmp} - 8$ ), приведены в таблице 4.1.6.

Таблица 4.1.6 – Средние значения результатов измерения микротвердости по  $HV$ , полученные в параллельных экспериментах

Номер точки	Расстояние от наружной цилиндрической поверхности заготовки, мм	Микротвердость при различных условиях шлифовальной операции, кгс/мм <sup>2</sup>	
		$V = 50$ м/с; $V_S = 2,5$ мм/мин; $\tau = 1$ с; $N_{cmp} - 12$	$V = 42,7$ м/с; $V_S = 2$ мм/мин; $\tau = 3$ с; $N_{cmp} - 8$ (технология АО «Кардан»)
1	0,22	751,2	580,5
2	0,44	741,5	514,3
3	0,66	663	458,3
4	0,88	635	458,8
5	1,1	643	464,1

С увеличением расстояния от наружной цилиндрической поверхности заготовки значения микротвердости уменьшаются. Микротвердость на расстоянии 0,22 мм выше, чем на расстоянии 1,1 мм, на 17 ... 25%. На расстоянии 0,66 ... 1,1 мм от наружной цилиндрической поверхности значения микротвердости практически не изменяются.

Шлифование на режиме, обеспечивающем лучшие результаты ( $V = 50$  м/с;  $V_s = 2,5$  мм/мин;  $\tau = 1$  с), формирует большие значения микротвердости, чем шлифование на режиме по заводской технологии. В точках № 1 и 2 микротвердость выше на 30 и 44% соответственно; в точках 3, 4 и 5 – выше в среднем на 40%. Это можно объяснить меньшей скоростью врезной подачи и меньшей температурой в зоне шлифования.

#### **4.1.6. Исследование эксплуатационных и физико-механических свойств поверхностного слоя шеек шипов крестовины карданного вала. Основные результаты и выводы**

В процессе выполнения экспериментальных исследований использованы методики оценки параметров качества поверхностного слоя обработанной поверхности: измерения неразрушающими методами на измерительной аппаратуре рентгеновского типа структурно-фазового состава и технологических остаточных напряжений 3-го рода в поверхностном слое деталей, измерения микротвердости поверхностного слоя, измерения параметров микрогеометрии и волнистости.

Установлено влияние рабочей скорости шлифования, скорости врезной подачи, времени выхаживания и структуры шлифовального круга на параметры качества поверхностного слоя.

Получены уравнения регрессии для расчета количества остаточного аустенита и остаточных напряжений, параметров шероховатости и волнистости, позволяющие определить условия и режим обработки заготовок деталей, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя.

Минимальные значения количества остаточного аустенита, остаточных напряжений 3-го рода, шероховатости и волнистости получены на режиме: рабочая скорость шлифовального круга  $V_k=50$  м/с, скорость врезной подачи  $V_S=2,5$  мм/мин; время выхаживания  $\tau=1$  с; номер структуры круга  $N_{cmp}=12$ .

Шлифование на этом режиме обеспечивает большие значения микротвердости, чем шлифование по заводской технологии.

#### 4.2. Основные выводы

1. Разработаны рабочие методики экспериментальных исследований параметров качества поверхностного слоя обработанной поверхности: измерения неразрушающими методами на измерительной аппаратуре рентгеновского типа структурно-фазового состава и технологических остаточных напряжений 3-го рода в поверхностном слое деталей, измерения микротвердости поверхностного слоя, измерения параметров микрогеометрии и волнистости.
2. Представлены результаты измерения структурно-фазового состава поверхностного слоя, остаточных напряжений 3-го рода в поверхностном слое и микротвердости образцов деталей.
3. Полученные результаты позволяют определить условия и режим обработки цементированных заготовок деталей, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя и наибольшую производительность процесса шлифовальной операции.
4. Минимальные значения количества остаточного аустенита, остаточных напряжений 3-го рода, шероховатости и волнистости получены на режиме: скорость основного круга  $V_k=50$  м/с, скорость врезной подачи  $V_S=2,5$  мм/мин; время выхаживания  $\tau=1$  с; номер структуры круга  $N_{cmp}=12$ . Обработка на данном режиме позволяет получить большие значения микротвердости, чем шлифование по заводской технологии, реализуемой в условиях АО «Кардан» (г. Сызрань).

## 5. Разработка технологических рекомендаций по применению результатов исследований и расчет ожидаемого экономического эффекта

### 5.1. Анализ существующей технологии шлифования шеек шипов крестовины в условиях АО «Кардан» (г. Сызрань)

В технологическом процессе изготовления крестовин шарниров карданных валов в условиях АО «Кардан» (г. Сызрань) после термической обработки цементацией шипов заготовки осуществляется операция бесцентрового шлифования на итальянском станке Romini Farrell Giustina International 267. В качестве основного абразивного инструмента на данном этапе механической обработки используются круги типа 1\*600\*22\*305 со следующими характеристиками: *92A F150 O 8 V5*. Для эффективного отвода тепла из зоны резания и предотвращения образования прижогов на обрабатываемой поверхности в зону шлифования поливом подается универсальная биостабильная полусинтетическая смазочно-охлаждающая жидкость «Coolant» из очищенных базовых масел, образующих полупрозрачные микроэмульсии. В действующем технологическом процессе АО «Кардан» (г. Сызрань) заготовки из цементированной стали 19ХГН шлифуют с рабочей скоростью круга  $V_k = 42,7$  м/с, со скоростью врезной подачи –  $V_S = 2$  мм/мин. Время выхаживания  $\tau$  составляет 3 секунды. Диаметр заготовки до шлифовальной операции –  $\varnothing 19,33 \pm 0,1$  мм. Диаметр отшлифованной поверхности  $\varnothing 19,065_{-0,013}$  мм. Соответственно припуск на шлифовальную операцию составляет 0,1325 мм.

В наладках при обработке шипов крестовин шарниров карданных валов (рис. 5.1.1) все шлифовальные круги монтируют на одной планшайбе. Линейное расстояние между торцами кругов определяется распорной втулкой. Аналогичным образом устанавливают ведущие круги. Оси шпинделей ведущих и шлифовальных кругов устанавливают параллельно, и обрабатываемая заготовка в процессе шлифования самоустанавливается между кругами.

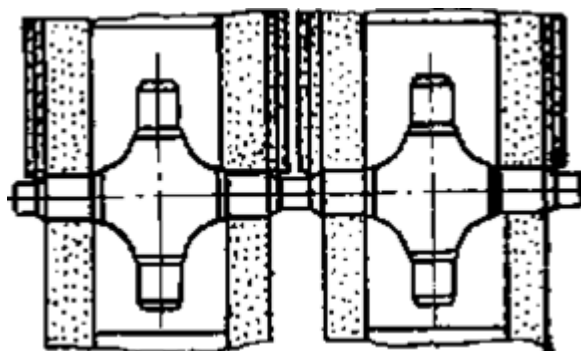


Рис. 5.1.1 – Схема наладок при обработке рабочих поверхностей шипов крестовины

За одну установку обрабатывается сразу четыре шипа, закаленных ТВЧ до твердости HRC 60—66, по наружному диаметру цилиндрической части и по фаске на полном автоматическом цикле. Две заготовки из магазина загружают в рабочую зону, устанавливают на опорном ноже и после шлифования первой пары шипов передаются в специальное кантовательное устройство, поворачивают на  $90^\circ$  и вновь устанавливают на ноже для обработки второй пары шипов.

По результатам проведенного в диссертационной работе экспериментального исследования (глава 4), лучшие показатели качества обработанных поверхностей были получены на опыте 12 (таблица 4.1.5), при проведении которых использовалась резная подача  $V_s=2,5$  мм/мин, рабочая скорость круга  $V_k = 50$  м/с, времени выхаживания  $\tau=1$  с.

## 5.2. Технологические рекомендации по проектированию операции шлифования заготовок из цементируемых сталей

Для совершенствования технологического процесса обработки заготовок из цементируемых сталей (на примере обработки крестовины карданного вала в условиях АО «Кардан») и с целью получения экономии ресурсов предлагается внедрить технологию с измененными режимами шлифования, обоснованными в рамках выполненных научных исследований. Предлагаемые режимы резания: рабочая скорость круга  $V_k = 50$  м/с, скорость врезной подачи –  $V_s = 2,5$  мм/мин, время выхаживания  $\tau$  составляет 1 секунду, припуск на шлифовальную операцию

равен 0,1325 мм. Высокопористый (12 структура) абразивный круг типа 1\*600\*22\*305 с характеристиками 92A F150 O 12 V5.

### **5.3. Оценка экономического эффекта от применения результатов исследований на примере выполнения операции бесцентрового шлифования шеек шипов крестовины в производственный процесс АО «Кардан»**

#### **5.3.1. Расчет капитальных затрат**

Суммарные капитальные затраты на усовершенствование технологического процесса производства крестовин карданного вала рассчитываются по формуле:

$$K = K_{об} + K_{пл} + K_{осн} + K_{зс} + K_{с.м}; \quad (5.3.1)$$

где  $K_{об}$  – стоимость нового оборудования;

$K_{пл}$  – стоимость занимаемой площади здания;

$K_{осн}$  – стоимость оснастки;

$K_{зс}$  – заготовительно-складские расходы;

$K_{с.м}$  – стоимость строительно-монтажных работ по установке, монтажу и наладке оборудования.

В связи с тем, что изменение технологии шлифовальной операции связано лишь с корректировкой режима резания, то капитальные затраты на закупку нового оборудования и оснастки, расширение производственных площадей и усовершенствование складского хозяйства затрачиваться не будут.

#### **5.3.2. Расчет текущих затрат на реализацию проекта**

Себестоимость продукции – это выраженные в денежной форме издержки производства на потребленные при изготовлении продукции материалы, полуфабрикаты, комплектующие, оплату труда рабочих, услуг других предприятий, а также затраты по управлению и обслуживанию производства.

Перечень статей затрат, их состав и методы распределения по видам продукции определяются отраслевыми методиками. Общий перечень статей калькуляции:

- сырье и основные материалы;
- покупные полуфабрикаты и комплектующие изделия;
- возвратные отходы;
- транспортно-заготовительные расходы;
- топливо и энергия на технологические цели;
- основная и дополнительная заработная плата основных производственных рабочих с начислениями;
- расходы на содержание и эксплуатацию технологического оборудования;
- цеховые расходы;
- общепроизводственные расходы;
- потери от брака;
- прочие производственные расходы;
- внепроизводственные расходы.

С учетом особенностей техники, технологии и организации производства в отрасли и на предприятиях в приведенную типовую номенклатуру статей затрат могут вноситься соответствующие дополнения и изменения. Затраты по первым десяти статьям составляют цеховую себестоимость. Если к цеховой себестоимости прибавить общепроизводственные и прочие производственные расходы, а также потери от брака, то получим производственную себестоимость, которая вместе с внепроизводственными расходами составит полную себестоимость продукции.

При изменении режимов резания в предлагаемом варианте ТП шлифовальной операции будут меняться следующие статьи затрат, входящие в технологическую себестоимость: расходы на топливо и энергию; основная и дополнительная заработная плата производственных рабочих с начислениями;

цеховые расходы; общепроизводственные расходы; потери от брака; прочие производственные расходы; внепроизводственные расходы.

Произведем расчет изменения себестоимости в связи с увеличением врезной подачи при шлифовании шеек крестовины карданного вала с  $V_S = 2$  м/мин до  $V_{S1} = 2,5$  м/мин и уменьшения времени выдержки  $t_{o.выд}$  с 3 до 1 секунды.

При этом машинное время на шлифовальной операции изменится на:

$$\Delta t_{o.шл} = \frac{z_{шл}}{V_{s1} - V_s} \cdot (t_{o.выд1} - t_{o.выд2}) \cdot 60 = \frac{0,1325}{2,5 - 2} \cdot (3 - 1) \cdot 60 = 2,8 \text{ с}, \quad (5.3.2)$$

где  $z_{шл}$  – припуск металла, снимаемый на операции бесцентрового шлифования.

Основное машинное время шлифовальной операции базового технологического процесса обработки детали составляет  $t_{o.шл.1} = 12,36$  с. Соответственно машинное время в предлагаемой технологии –  $t_{o.шл.2} = 9,56$  с.

Относительное изменение трудоемкости операции бесцентрового шлифования:

$$\Delta T_{шл} = \frac{\Delta t_{o.шл}}{T_{шл.зав}} \cdot 100\% = \frac{2,8}{16,05} \cdot 100\% = 17,45\%, \text{ где} \quad (5.3.3)$$

$T_{шл.зав}$  – трудоемкость операции бесцентрового шлифования крестовины карданного вала по заводской технологии в условиях АО «Кардан».

В 2025 году общая годовая трудоемкость шлифовальной операции на производство крестовин карданных валов составила 7359,08 часов и было выпущено 465122 единицы.

В итоге, если будет применена измененная технология операции бесцентрового шлифования, годовая трудоемкость обработки этого же количества деталей снизиться на:

$$\Delta T_{год.шл} = T_{год.шл} \cdot \Delta T_{шл} = 7359,08 \cdot 0,1745 = 1284,16 \text{ ч} \quad (5.3.4)$$

На статью «Топливо и энергия на технологические цели» относится стоимость топлива и энергии, расходуемая в соответствии с установленным технологическим процессом  $C_{эл}$ .

Годовая экономия по статье «Топливо и энергия на технологические цели»:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{эл.шл.}} = \Delta T_{\text{год.шл.}} \cdot C_{\text{эл.}} = 1284,16 \cdot 85,28 \text{ руб.} = 109513,17 \text{ руб.}, \quad (5.3.5)$$

где  $C_{\text{эл.}}$  – стоимость электроэнергии, используемой за 1 час работы всего основного оборудования бесцентровошлифовальной операции на АО «Кардан».

По статье «Основная заработная плата основных производственных рабочих» планируется и учитывается основная зарплата рабочих за работу, выполняемую по изготовлению продукции. В состав основной заработной платы производственных рабочих входит оплата операций по сдельным нормам и расценкам, а также по повременной системе оплаты труда рабочих – повременщиков, занятых непосредственно выполнением производственного процесса. Основная зарплата основных производственных рабочих относится на себестоимость отдельных изделий прямым счетом. Для рабочих, занятых на сдельных работах, она определяется (в руб.) по формуле:

$$C_o = \sum_i^m T_{\text{ст.}} \cdot t_{\text{шт.}i} = \frac{T_{\text{ст.}}}{H_{\text{вып.}i}}; \quad (5.3.6)$$

где  $m$  – число операций в технологическом процессе;

$t_{\text{шт.}i}$  – норма времени на выполнении  $i$ -й операции;

$T_{\text{ст.}}$  – тарифная ставка;

$H_{\text{вып.}i}$  – часовая норма выработки на  $i$ -й операции.

Общая годовая экономия по статье «Заработная плата основных производственных рабочих» рассчитывается по формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{о.шл.}} = \Delta T_{\text{год.шл.}} \cdot T_{\text{ст.шл.}} = 1284,16 \cdot 234,24 = 300801,64 \text{ руб.}, \quad (5.3.7)$$

где  $T_{\text{ст.шл.}}$  – часовая тарифная ставка с учетом всех дополнительных выплат стимулирующего характера бригады №13 АО «Кардан», которая осуществляет бесцентровошлифовальную операцию в рамках производственного процесса предприятия.

На статью «Дополнительная заработная плата основных производственных рабочих» относятся выплаты, предусмотренные законодательством, за не проработанное на производстве время рабочих: оплата отпусков, оплата льготных

часов, выплаты за выслугу лет, за выполнение государственных обязанностей и др. Она определяется по формуле:

$$C_{\text{доп}} = C_o \cdot K_3 \quad (5.3.8)$$

$K_3$  – коэффициент, характеризующий отношение суммы дополнительной заработной платы производственных рабочих к основной. В условиях АО «Кардан»  $K_3=0,15$ .

Годовая экономия по статье «Дополнительная заработная плата основных производственных рабочих»:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{доп.пл.}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{о.пл.}} \cdot K_3 = 300801,64 \cdot 0,15 = 45120,25 \text{ руб.} \quad (5.3.9)$$

Сумма отчислений на социальные нужды ( $C_{\text{нач}}$ ) определяется в соответствии с установленной нормой отчислений в процентах к расходам на основную и дополнительную заработную плату производственных рабочих, которая в соответствии с действующим законодательством  $C_{\text{нач}}=30,2\%$ .

Годовая экономия от отчислений на социальные нужды составит:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{нач}} = (\Delta \mathcal{E}_{\text{о.пл.}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{доп.пл.}}) \cdot C_{\text{нач}} = (300801,64 + 45120,25) \cdot 0,302 = 104468,41 \text{ руб.} \quad (5.3.10)$$

На статью «Расходы на содержание и эксплуатацию технологического оборудования» ( $C_p$ ) относятся:

- содержание, текущий ремонт, амортизация производственного оборудования транспортных средств и ценных инструментов;
- заработная плата основная и дополнительная вместе с начислениями на социальные нужды вспомогательных рабочих;
- возмещение износа быстро изнашивающихся инструментов и расходов по их восстановлению;
- затраты на воду и пар;
- прочие расходы, связанные с работой оборудования.

На практике в условиях АО «Кардан» используют расчет затрат на содержание и эксплуатацию технологического оборудования пропорционально (80%) от основной заработной платы производственных рабочих.

Годовая экономия по статье «Расходы на содержание и эксплуатацию технологического оборудования»:

$$\Delta \mathcal{E}_{p.шл} = 0,8 \cdot \Delta \mathcal{E}_{o.шл} = 0,8 \cdot 300801,64 = 240641,31 \text{ руб.} \quad (5.3.11)$$

На статью «Цеховые расходы» ( $C_{ц}$ ) относятся следующие затраты:

- основная и дополнительная заработная плата вместе с начислениями на социальные нужды цехового персонала (инженеров, техников, экономистов, служащих и др.), а также вспомогательных рабочих, занятых на хозяйственных работах;
- расходы по охране труда и технике безопасности;
- содержание, текущий ремонт, амортизация зданий, сооружений и инвентаря цехового назначения;
- расходы по опытам, изобретательству и рационализации.

Цеховые расходы распределяются пропорционально основной заработной плате основных производственных рабочих (80%).

Годовая экономия по статье «Цеховые расходы»:

$$\Delta \mathcal{E}_{ц.шл} = 0,8 \cdot \Delta \mathcal{E}_{o.шл} = 0,8 \cdot 300801,64 = 240641,31 \text{ руб.} \quad (5.3.12)$$

На статью «Общепроизводственные расходы» ( $C_{об}$ ) относятся следующие затраты:

- заработная плата основная и дополнительная вместе с отчислениями на социальные нужды заводского административно – управленческого персонала;
- амортизация общезаводских зданий, складов и инвентаря;
- расходы по служебным командировкам;
- расходы по охране труда;
- расходы по подготовке кадров и на организованный набор рабочей силы;
- налоги и сборы, прочие обязательные расходы и отчисления.

Общепроизводственные расходы распределяются пропорционально сумме основной заработной платы основных производственных рабочих (80%).

Годовая экономия по статье «Общепроизводственные расходы»:

$$\Delta \mathcal{E}_{об.шл} = 0,8 \cdot \Delta \mathcal{E}_{o.шл} = 0,8 \cdot 300801,64 = 240641,31 \text{ руб.} \quad (5.3.12)$$

На статью «Внепроизводственные расходы» ( $C_8$ ) относятся затраты, связанные в основном с реализацией готовой продукции:

- расходы по таре и упаковке;
- расходы по доставке продукции на станцию отправления;
- содержание персонала, обеспечивающего нормальную эксплуатацию у потребителя в пределах уставленного срока;
- расходы на научно – исследовательские работы.

Годовая экономия на внепроизводственные расходы  $\Delta \mathcal{E}_{в.шл}$  рассчитывается в размере 3% от годовой экономии на производственной себестоимости шлифовальной операции  $\Delta \mathcal{E}_{пр.шл}$ .

$$\Delta \mathcal{E}_{пр.шл} = \Delta \mathcal{E}_{эл.шл} + \Delta \mathcal{E}_{о.шл} + \Delta \mathcal{E}_{доп.шл} + \Delta \mathcal{E}_{нач} + \Delta \mathcal{E}_{р.шл} + \Delta \mathcal{E}_{ц.шл} + \Delta \mathcal{E}_{об.шл} = 1281827,4 \text{ руб.} \quad (5.3.13)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{в.шл} = 0,03 \cdot \Delta \mathcal{E}_{пр.шл} = 0,03 \cdot 1281827,4 = 38454,82 \text{ руб.} \quad (5.3.14)$$

Итого годовая экономия от полной себестоимости выпуска крестовин карданного вала на АО «Кардан» составит:

$$\Delta \mathcal{E}_{полшл} = \Delta \mathcal{E}_{пр.шл} + \Delta \mathcal{E}_{в.шл} = 1320282,22 \text{ руб.} \quad (5.3.15)$$

Таблица 5.3.1 – Основные технико-экономические показатели внедрения результатов исследования

Наименование показателя	Единицы измерения	Обозначение	Значение показателя базового ТП	Значение показателя нового ТП
Годовая программа выпуска деталей	шт.	$\Pi$	465122	465122
Основное машинное время шлифовальной операции	с	$t_{о.шл}$	12,36	9,56
Уменьшение основного машинного времени шлифовальной операции	с	$\Delta t_{о.шл}$	0	2,8

Трудоемкость шлифования одной детали	с	$T_{шл}$	56,96	54,16
Относительное уменьшение трудоемкости шлифования одной детали	%	$\Delta T_{шл}$	0	17,45
Годовая трудоемкость шлифования деталей	ч	$T_{год.шл}$	7359,08	6997,5
Снижение годовой трудоемкости шлифования деталей	ч	$\Delta T_{год.шл}$	0	361,58
Годовая экономия	руб.	$\Delta \mathcal{E}_{полн.шл}$	0	1320282,22
Относительная экономия затрат на производство крестовины карданного вала	%	$\Delta C$	0	0,54

### 5.3.3 Оценка экономической эффективности

#### технологических рекомендаций по применению результатов исследований в условиях АО «Кардан»

При общем подходе к оценке экономической эффективности технического проекта каждый тип технического решения требует учета особенностей данной системы и, прежде всего, конкретизации социально – экономических результатов функционирования создаваемой системы в соответствии с её назначением. Необходимо оценить влияние проектируемого решения на конечные результаты деятельности предприятия или его подразделений.

Основными показателями экономической эффективности проекта являются: снижение текущих затрат, срок окупаемости капитальных вложений, годовой экономический эффект, получаемый при внедрении его в производство. Годовой экономический эффект представляет собой суммарную экономию всех

производственных ресурсов, включая капитальные вложения, которую получит предприятие в результате внедрения технического проекта.

Определение годового экономического эффекта основано на сопоставление приведенных затрат на единицу продукции до и после внедрения проекта. Приведенные затраты на единицу продукции представляют собой сумму удельных текущих издержек производства (себестоимости продукции) и единовременных затрат (капитальных вложений) с учетом нормативного коэффициента эффективности.

Относительная экономия затрат определяется как:

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100 = \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{полн}}}{C_{\text{дет}} \cdot \Pi} \cdot 100 = \frac{1320282,22}{530 \cdot 465122} \cdot 100 = 0,54\% \quad (5.3.16)$$

Годовой экономический эффект при внедрении новых и совершенствовании действующих технологических процессов, средств механизации и автоматизации производства рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_z = (C_1 - C_2) - E_n(K_2 - K_1), \quad (5.3.17)$$

где  $C_1, C_2$  – себестоимость годового объема выпуска крестовин до и после внедрения технического проекта, руб.;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности (0,15).

$K_1$  и  $K_2$  – удельные капитальные вложения на единицу продукции до и после внедрения проекта, руб.

В условиях предлагаемых технологических решений, когда капитальные вложения не требуются, годовой экономический эффект будет равен годовой экономии от полной себестоимости выпуска крестовин карданного вала на АО «Кардан», рассчитанной по зависимости (5.2.15):

$$\mathcal{E}_z = \Delta \mathcal{E}_{\text{полн}} = 1320282,22 \text{ руб.} \quad (5.3.18)$$

Срок окупаемости капитальных вложений определяется по формуле:

$$T = \frac{K_2}{(C_1 - C_2)}, \quad (5.3.19)$$

В связи с тем, что предложенные изменения технологии шлифовальной операции не требуют капиталовложений, рассчитывать срок окупаемости проекта не требуется, так как АО «Кардан» сможет сразу после корректировки технологического процесса начать получать дополнительный доход.

### Заключение

1. Процесс шлифования цементируемых сталей в пределах толщины цементируемого слоя сопровождается возникновением явления абразивной износостойкости. Само понятие «абразивная износостойкость» широко используется в терминологии многими исследователями в области шлифования и объясняется как процесс сопротивления отделению микрочастиц материала от изнашиваемой абразивными телами поверхности под действием нормальной силы резания с частичным преобразованием наружного слоя в стружку.
2. Представлена новая модель рабочей поверхности и внутренней структуры шлифовального круга, построенная на параметрах  $b_p$ ,  $v_p$  кривых профиля абразивного зерна.
3. Теоретически и экспериментально определены геометрические параметры режущих кромок а.з.: параметры  $b_p$ ,  $v_p$  кривых профиля, описывающих их распределение по высоте режущей кромки; угол при вершине режущей кромки  $\varepsilon$ , радиус вершины режущей кромки  $\rho$  и коэффициент формы зерна  $K_f$ ; процентное содержание «режущих» кромок в зависимости от глубины резания.
4. Разработана математическая модель, описывающая основную номенклатуру форм абразивных зерен шлифовальных кругов и позволяющая осуществлять рациональный выбор их характеристик для шлифования цементированных заготовок.
5. Установлена взаимосвязь основных показателей качества и эксплуатационных характеристик шлифованных деталей из цементируемых сталей с условиями их формообразования.

6. Предложены и апробированы новые методики экспериментальных исследований геометрических параметров абразивного зерна и структуры шлифовального круга, разработана и реализована методика инженерных расчетов количества а.з., находящихся на рабочей поверхности шлифовального круга по расчетам параметра штучной плотности абразивного материала и методика выбора эффективных режимов шлифования путем моделирования внутренней структуры абразивного круга.

7. Разработаны технологические рекомендации по шлифованию заготовок из цементированных сталей, позволяющие определить условия и режим обработки заготовок из цементированных сталей высокопористыми шлифовальными кругами.

8. По результатам опытно-промышленных испытаний результатов диссертационных исследований в действующем производстве АО «Кардан» (г. Сызрань) уменьшена трудоёмкость механической обработки крестовины на операции бесцентрового шлифования на 17,5% и выполнен расчет ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения (1млн 320 тысяч рублей).

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБЪЕДИНЕНИЙ

## 1. Основные сокращения

АИ - абразивный инструмент;

а.з. – абразивное зерно;

АЦП - аналого-цифровой преобразователь;

ПС – поверхностный слой;

РП – рабочая поверхность;

РПС - рабочий поверхностный слой;

СОЖ - смазочно-охлаждающие жидкости;

ТОН - технологические остаточные напряжения;

ХТО – химико-термическая обработка;

ШК - шлифовальный круг.

## 2. Условные обозначения

$\Delta_{z.max}$  – максимальное заглублиение зерен, мм;

$\Delta_{z.sp}$  – среднестатистическое заглублиение зерен, мм;

$\Delta r$  – съём материала, мм;

$T$  – время обработки, с;

$\mu$  - коэффициент, учитывающий заполнение круга связкой и наполнителем;

$a$  – толщина среза, мм;

$a, b$  – полуоси эллипсоида вращения, мм;

$B$  – ширина круга, мм;

$C_m$  – структура круга (процент содержания абразивного зерна в объеме круга);

$d_0$  – диаметр окружности, мм;

$D_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр, мм;

$h_H$  – составляющая образования навалов, мм;

$H$  – величина слоя, в котором распределена шероховатость, мм;

$H_p$  – толщина регистрирующей пластины ролика, мм;

$H_k$  – твердость круга, обозначаемая порядковым номером по шкале Нортон, кгс/мм<sup>2</sup>;

$k$  – поверхностная концентрация зерен круга, шт./мм<sup>2</sup>;

$k_3^l$  – коэффициент, учитывающий величину подачи круга за один оборот заготовки;

$K_3$  – параметры концентрации зерна, шт./мм<sup>2</sup>;

$K_c$  – параметры связки;

$K_C$  – коэффициент стружкообразования;

$K_{\text{пор}}$  – параметры пор;

$l$  – базовая длина, мм;

$l_{\phi l}$  – размер площадки затупления на зерне, мм;

$m_{\text{им}}$  – число зафиксированных импульсов, шт.;

$n$  – число зерен в единице объема (1 мм<sup>3</sup>) режущего слоя круга для алмазных и кубонитридных кругов, шт.;

$n_3$  – количество зерен в единице объема рабочего слоя инструмента, шт.;

$n_{z.o}$  – удельное количество зерен в одной линии резания, шт.;

$N_p$  – число зерен на единице площади шлифовального круга, шт.;

$N_{p,max}$  – максимальное число режущих зерен, приходящихся на единицу площади круга на глубине слоя  $\Delta_z = \Delta_{z,max}$ , шт.;

$N_p^0$  – число зерен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью при отсутствии съема металла, шт.;

$p_k$  – длина контура проекции зерна, мм;

$P$  – радиус округления вершины резца, мм;

$R_a$  – параметр шероховатости поверхности, мкм;

$R_{a\phi}$  – фактическое значение среднего арифметического отклонения неровностей профиля, мкм;

$S_k$  – площадь контура зерна, мм<sup>2</sup>;

$S_w$  – шаг волны, мм;

$t_e$  – время воздействия круга, с;

$t_\phi$  – фактическая глубина микрорезания, мм;

$y$  – расстояние от условной наружной поверхности инструмента до уровня, на котором рассчитывается съем материала, мм;

$V_k, V_u$  – окружная скорость инструмента и заготовки, м/с;

$V_0$  – единичный объем рабочего слоя абразивного инструмента, мм<sup>3</sup>;

$x_n$  – номинальный, паспортный размер зерна, мм;

$W_z$  – высота волны, мм;

$W_m$  – расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля, мм;

$Z$  – количество абразивных зерен в единице объема абразивосодержащего материала, шт.;

$A$  – угол между противоположными гранями на вершине наконечника ( $136^\circ$ ) в виде правильной четырехгранной пирамиды,  $^\circ$ ;

$F$  – нагрузка (статическая сила), примененная в процессе измерения, Н;

$D$  – среднеарифметическое значение двух длин диагоналей, мм;

$HV$  – твердость по Виккерсу, кгс/мм<sup>2</sup>;

$\Delta$  – величина погрешности цифровых весов, г;

$\sigma_i$  – величина остаточных напряжений, Па;

$\varepsilon$  – радиус закругления режущей кромки, мм;

$\rho$  – угол при вершине режущей кромки,  $^\circ$ ;

$\rho_{шт}$  – значение штучной плотности, шт./г;

$\rho_{шт.i}$  – параметр штучной плотности для  $i$ -того эксперимента, шт./г;

$L$  – длина режущей кромки, мм;

$\beta$  – угол при вершине зерна,  $^\circ$ ;

$\nu_p$  – коэффициент, определяющий форму единичной неровности;

$b_p$  – коэффициент, учитывающий ее наполненность;

$b_i$  – коэффициент регрессии;

$y$  – глубина внедрения зерна в обрабатываемую поверхность, мм;

$y_{вн}$  – высота части единичной режущей кромки, мм;

$S_p$  – радиальная подача шлифовального круга на оборот заготовки, мм/об;

$C_{ц.т.}$  – расстояние от центра тяжести зерна до самой выступающей его вершины, мм;

$y_{ц.м.}$  – расстояние от центра масс до его вершины, мм;

$d_0$  – диаметр, описанной около а.з. окружности, мм;

$d_{зерн}$  – диаметр сферы, описывающей абразивное зерно, мм;

$F$  и  $S$  – площадь сечения, в котором действуют касательные напряжения сдвига, мм<sup>2</sup>;

$F_n$  – текущее фокусное расстояние, мм;

$F_{min}$  – минимальное фокусное расстояние для данной фотокамеры, мм;

$F_{тр.}$  – сила трения а.з по обрабатываемой поверхности, Н;

$F_p$  – сила резания, Н;

$F_{pmax}$  – критическая сила резания, Н;

$H_{кр}$  – высота инструмента, мм;

$H_{м.с.}$  – высота мостика связки, мм;

$HV$  – твердость обрабатываемой поверхности, кгс/мм<sup>2</sup>;

$h_i$  – высота слоя связки, обволакивающей абразивные зерна, мм;

$h_{изн.}$  – высота изношенного истиранием сегмента зерна, мм;

$I_p$  – задаваемое с вероятностью  $p$  максимальное допустимое отклонение среднего значения от истинного;

$k$  – количество экспериментов, шт.;

$K$  – количественное соотношение фаз;

$K_n$  – коэффициент пористости, величина которого пропорциональна твердости круга;

$K_{устир.}$  – коэффициент, характеризующий долю износа истиранием абразивного инструмента при заданных режимах резания;

$l_{обр.}$  – длина обработанной части заготовки, мм;

$I_{max\gamma-Fe}$ ,  $I_{max\alpha-Fe}$  – интенсивности пиков, соответствующих аустениту ( $\gamma$ -железо) и ферриту ( $\alpha$ -железо);

$m$  – число замеров в предварительном эксперименте, шт.;

$m_{обр.}$  – масса абразивного вещества, г;

$n_{зер}$  – число абразивных зерен, шт.;

$n_{зер.раб.нов.}$  – число абразивных зерен, шт.;

$n_{стр.ед.}$  – число структурных единиц в круге, шт.;

$n_{заг}$  – количество оборотов шпинделя заготовки в минуту, об/мин;

$n_{кр}$  – количество оборотов шпинделя круга в минуту, об/мин;

$N$  – сила нормального давления на а.з. в процессе шлифования, Н;

$N_{зер}$  – номер зернистости шлифовального круга;

$N_{кр}$  – критическая сила нормального давления, Н;

$N_{стр}$  – номер структуры абразивного инструмента;

$\rho_{обр}$  – плотность абразива, г/мм<sup>3</sup>;

$p_{ср}$  – усредненное количество мостиков связки, закрепляющих абразивные зерна в структуре круга, шт.;

$p_k$  – касательные напряжения, действующие по контактной поверхности, Па;

$p_r$  – фактическое давление на площадку износа а.з., Па;

$r_{зер}$  – диаметр сферы, описанной вокруг зерна, мм;

$R_{нар}$  – наружный радиус круга, мм;

$R_{вн}$  – радиус его посадочного отверстия, мм;

$S$  – площадь нормального сечения, мм<sup>2</sup>;

$S$  – подача круга, мм/об.;

$S_p$  – радиальная подача круга, мм/об.;

$S_{\Delta}$  – удельная площадь абразивной поверхности, приходящаяся на одно зерно, мм<sup>2</sup>;

$S^2(Y_i)$  – дисперсия определяемого параметра;

$t_{p(m-1)}$  – величина коэффициента Стьюдента для вероятности  $p$  при числе замеров  $m$ ;

$t$  – глубина резания, мм;

$y$  – глубина внедрения режущей кромки, мм;

$V_{\sigma}$  – коэффициент вариации;

$V_{\text{зер}}$  – объем одного а.з., мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{обр}}$  – объем всего абразивного материала в шлифовальном круге, мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{кр}}$  – объем круга, мм<sup>3</sup>;

$V_n$  – объем пор, мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{стр.ед.}}$  – объем структурной единицы, мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{м.с.}}$  – объем мостика связки цилиндрической формы, мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{св.обв.}}$  – количество связки, обволакивающей все абразивные зерна круга, мм<sup>3</sup>;

$V_{\Sigma\text{м.с.}}$  – объем связующего вещества, израсходованной на все мостики, мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{изн.абр. инстр.}}$  – объем изношенного абразивного инструмента, мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{изн.истир.абр.инстр.}}$  – объем изношенного истиранием абразивного инструмента, мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{изн.истир.инстр.}}$  – объем изношенных истиранием зерен, мм<sup>3</sup>;

$V_{\text{изн.сегм.зерна}}$  – объем изношенного истиранием сегмента зерна, мм<sup>3</sup>;

$V_{мет.}$  – объем металла, срезанного в процессе шлифования, мм<sup>3</sup>;

$V_k$  – скорость вращения абразивного круга, м/с;

$V_z$  – скорость вращения заготовки, м/мин;

$M$  – коэффициент трения скольжения;

$\sigma_n$  – нормальные напряжения, Па;

$\tau$  – прочность адгезионной связи, Па;

$\Delta Y_i$  – абсолютная погрешность измерения критерий;

$\Delta_{Y_{ic}}$  – систематическая погрешность измерения;

$\sigma_{Y_i}$  – средняя квадратическая погрешность измерения;

$t_p \cdot \sigma_{Y_i}$  – случайная погрешность измерения;

$Y_j$  – параметр, определенный по результатам прямого измерения;

$j$  – номер параллельного опыта;

$\nu$  – номер точки плана матрицы;

$Y_{\nu,j}$  – величина параметра оптимизации в  $j$ -ом параллельном опыте в  $\nu$ -ой точке плана эксперимента;

$\ell$  – число значимых коэффициентов регрессии, включая  $b_0$ ;

$\hat{Y}_{\nu,A}$  – значение оптимизации для каждой точки плана матрицы эксперимента, рассчитанное по уравнению регрессии;

$K_{об}$  – стоимость нового оборудования, руб.;

$K_{пл}$  – стоимость занимаемой площади здания, руб.;

$K_{осн}$  – стоимость оснастки, руб.;

$K_{з.с.}$  – заготовительно-складские расходы, руб.;

$K_{с.м.}$  – стоимость строительно-монтажных работ по установке, монтажу и наладке оборудования, руб.;

$K_z$  – коэффициент, характеризующий отношение суммы дополнительной заработной платы производственных рабочих к основной;

$z_{шл}$  – припуск металла, снимаемый на операции бесцентрового шлифования, мм;

$C_{эл}$  – стоимость электроэнергии, используемой за 1 час работы всего основного оборудования бесцентровошлифовальной операции, руб.;

$T_{ст.шл}$  – часовая тарифная ставка с учетом всех дополнительных выплат стимулирующего характера, руб./ч.;

$P$  – годовая программа выпуска деталей, шт.;

$t_{о.шл}$  – основное машинное время шлифовальной операции, с;

$\Delta t_{о.шл}$  – изменение основного машинного времени шлифовальной операции, с;

$T_{шл}$  – трудоемкость шлифования 1 детали, с;

$\Delta T_{шл}$  – относительное изменение трудоемкости шлифования 1 детали, %;

$T_{год.шл}$  – годовая трудоемкость шлифования деталей, ч;

$\Delta T_{год.шл}$  – снижение годовой трудоемкости шлифования деталей, ч;

$\Delta \mathcal{E}_{полн.шл}$  – годовая экономия, %;

$\Delta C$  – относительная экономия затрат на производство крестовины карданного вала;

$\mathcal{E}_z$  – годовой экономический эффект при внедрении новых и совершенствовании действующих технологических процессов, средств механизации и автоматизации производства, руб.;

$C_1, C_2$  – себестоимость годового объема выпуска крестовин до и после внедрения технического проекта, руб.;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности (0,15);

$K_1$  и  $K_2$  – удельные капитальные вложения на единицу продукции до и после внедрения проекта, руб.;

$T$  – срок окупаемости капитальных вложений, год.

**Режущая кромка абразивного зерна** – рабочая часть абразивного зерна, представляющая собой сегмент объемной фигуры второго порядка.

**Внутренняя структура шлифовального круга** – конфигурация взаимного расположения в шлифовальном круге а.з., связки и пор, влияющая на силовые и температурные факторы процесса шлифования.

**Штучная плотность** – это характеристика, определяющая число а.з., находящихся в единице массы шлифовального материала.

### Список литературы

1. Федотов, В. В. К оценке взаимосвязи условий шлифования цементируемых заготовок с параметрами качества поверхностного слоя / В. В. Федотов, А. Ю. Полубанов, Е. С. Киселев, А. Н. Унянин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - 2023. - № 4 (83). - С. 57–64.
2. Блурцян, Р. Ш. Исследование технологических остаточных напряжений в поверхностных слоях крестовин при бесцентровом шлифовании / Р. Ш. Блурцян, Д. Р. Блурцян, И. Р. Блурцян // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. - 2011. - № 3. - С. 34–38.
3. Дощечкина, И. В. Роль разных способов поверхностной обработки в повышении усталостной прочности изделий / И. В. Дощечкина, В. Р. Семенчук // Вестник ХНАДУ. - 2018. - Вып. 82. - С. 44–50.
4. Руденко, С. П. Сопротивление контактной усталости крупномодульных зубчатых колес из хромоникелевых сталей / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. А. Шишко, П. Г. Карпович // Механика машин, механизмов и материалов. - 2019. - № 1 (46). - С. 58–63.
5. Пахомова, С. А. Контактная выносливость и износостойкость теплостойкой стали после разных видов цементации / С. А. Пахомова, М. Ю. Рыжова, Р. С. Фахуртдинов, М. А. Макушина, А. И. Пикалов, В. В. Усова, Н. А. Юшин // Вестник научно-технического развития. - 2016. - № 9 (109). - С. 19–28.
6. Малинов, Л. С. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость цементируемых сталей с повышенным содержанием углерода после термообработки / Л. С. Малинов, И. Е. Малышева // Вестник Приазовского государственного технического университета. - 2000. - Вып. 9. - С. 92–94.
7. Малинов, Л. С. Универсальность принципа получения в структуре сталей и чугунов метастабильного аустенита для повышения их абразивной износостойкости / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов, И. Е. Малышева, Д. В. Бурова // Трение и износ. - 2022. - Т. 43, № 3. - С. 282–291.

8. Старков, В. К. Шлифование высокопористыми кругами / В. К. Старков. // Машиностроение. - 2007. – 688 с.
9. Майсурадзе, М. В. Цементация, нитроцементация и азотирование / М. В. Майсурадзе, М. А. Рыжков, С. В. Беликов, Корниенко, М. С. Карабаналов, А. Ю. Жилияков. - Екатеринбург: Изд-во У С. Ю.рал. ун-та, 2021. - 102 с.
10. Гадалов, В. Н. Абразивная износостойкость металлических материалов с цементитосодержащими структурами / В. Н. Гадалов, А. А. Афанасьев, Д. Н. Романенко, Ю. В. Болдырев, Л. Г. Рагулина, С. В. Шестакина // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. - 2011. - № 4. - С. 45–49.
11. Садовский, В. Д. Структурная наследственность в стали. Серия «Успехи современного металловедения». М., «Металлургия» 1973, с. 208.
12. Гуляев, А. П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgy, 1986. – С. 544.
13. Маслов, Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов // М.: Машиностроение, 1974. – С. 320, ил.
14. Солер, Я. И. Количественная оценка прижогов при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 40Х абразивными кругами различной пористости / Я. И. Солер, Д. Ю. Казимиров, В. Л. Нгуен // Metal working and material science. - 2015. - № 1 (66). - Pp. 6–19.
15. Караванова, А. Г. Исследование операции зубошлифования цилиндрических колес планетарных передач / А. Г. Караванова, А. С. Калашников // XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов. - 2019. - С. 256–259.
16. Полканов, Е. Г. Шлифование зубчатых колес по различным технологическим схемам высокопористыми кругами / Е. Г. Полканов, В. С. Новиков, С. А. Рябцев // Вестник МГТУ «Станкин». - 2014. - № 3 (30). - С. 79–82.

17. Королев, А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 191 с.
18. Новоселов, Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1979.–231 с.
19. Островский, В. И. Теоретические основы процесса шлифования / В. И. Островский. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 144 с.
20. Филимонов, Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. – 248 с.
21. Филимонов, Л. Н. Стойкость шлифовальных кругов / Л. Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1973. – 136 с.
22. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч1. / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 191 с.
23. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч. 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов.–Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 191 с.
24. Исаков, В.М. Оптимизация автоматических циклов шлифования, обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности.: дис.... канд. техн. наук: 05.02.08 / Исаков Владислав Михайлович. - Челябинск, 1991. -155 с.
25. Курдюков, В.И. Научные основы проектирования абразивных инструментов / В.И. Курдюков. - Курган: КГУ, 2006. – 159 с.
26. Пирозерская, О. Л. Анализ возможностей применения современных способов изготовления и восстановления автомобильных деталей разных классов с целью повышения их надежности / О. Л. Пирозерская, А. Н. Малышев // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2012. – № 4(22). – С. 14-19.
27. Ватанабе, К. Теория шлифования (часть 2 – износ шлифовального круга) / Ватанабе // Перевод с японского, статья «Эндзиния – рингу», 1957. - № 4. ВИНТИ. М. - 1963.

28. Широков, А.В. К вопросу о прогнозировании и обеспечении параметров шероховатости шлифованной поверхности / А.В. Широков, А.П. Осипов // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – № 6. – С. 76 – 88.
29. Широков, А.В. Исследование топограмм шлифовальных кругов различных характеристик / А.В. Широков, А.П. Осипов, Р.Н. Мансуров // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – № 10. – С. 76 – 80.
30. Лурье, Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье // М., Изд-во «Машиностроение». – 1969. - 172 с.
31. Лурье, Г.Б. Шлифование на высоких скоростях быстрорежущими шлифовальными кругами / Г.Б. Лурье // «Вестник машиностроения». – 1945. - №6-7.
32. Лурье, Г.Б. Теория рабочего цикла при круглом шлифовании, как основа высокопроизводительной обработки / Г.Б. Лурье // Сб. Основные вопросы высокопроизводительного шлифования, под ред. Е.Н. Маслова, М., Машгиз, 1960.
33. Абаков, Л. В. К вопросу о закономерностях процесса самозатачивания абразивного инструмента / Л.В. Абаков // Сб. Новые исследования в области обработки металлов резанием под ред. Е. Н. Маслова. М., Машгиз, 1957.
34. Васильев, Н. Н. Определение качества шлифовальных кругов / Н.Н. Васильев // Сб. Высокопроизводительное шлифование. М., Изд. АН СССР, 1962.
35. Залкинд, Л. И. Отделочное шлифование кругами средней зернистости / Л. И. Залкинд // М., 1954. - 16 с. - (Периодич. информация; Тема № 19).
36. Сильвестров, В. Д. Безалмазная правка шлифовальных кругов / В. Д. Сильвестров // – М.: Оборонгиз. – 1955. - 128 с.
37. Владецкая, Е. А. Обеспечение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.07 / Владецкая Екатерина Александровна. – Севастополь, 2017. – 22 с.

38. Фадеев, В.А. Теоретическое обоснование взаимосвязи точности, шероховатости и производительности при механической обработке [текст] / В.А. Фадеев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. трудов. - ДГМА. - 2003. - Вып. 14. - С. 134 - 140.
39. Гришин, Р. Г. Математическая модель формирования напряжений в мостиках связки при спекании абразивного инструмента / Р. Г. Гришин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2009. – № 1(23). – С. 119-124.
40. Иванова, Т.Н. Исследование структуры поверхностного слоя при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2005. – № 3(28). – С. 30-32
41. Бишутин, С. Г. Особенности формирования микро- и наноструктурных состояний поверхностных слоев деталей при шлифовании / С. Г. Бишутин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 2(47). – С. 29-31.
42. Романов, В. Ф. Правка и профилирование абразивного, алмазного и эльборового инструмента / В. Ф. Романов, В. В. Авакян // Москва: Машиностроение, 1976. - 30 с.
43. Каминский, М.Е. Правка шлифовальных кругов алмазными инструментами / М.Е. Каминский // Москва ; Киев. - 1960. - 4 с.
44. Кузнецов, А.М. Технологические основы создания методов обработки в машиностроении: дис. д-ра техн. наук: 05.02.08 / Кузнецов Анатолий Михайлович. - М., 1975. - 317 с.
45. Лурье, Г.Б. Абразивные инструменты и их эксплуатация/ Г.Б. Лурье // М.: Машиностроение, 1971. - 62 с.
46. Любомудров, В. Н. Абразивные инструменты и их изготовление / В. Н. Любомудров, Н. Н. Васильев, Б.И. Фальковский // М.-Л.: МАШГИЗ, 1953. - 376 с.

47. Маслов, Е.Н. Перспективы дальнейшего развития научных исследований в области обработки материалов шлифовальным инструментом / Е.Н. Маслов // Прогрессивные методы абразивной, алмазной и эльборной обработки в машиностроении: Тез. докл. Всес. науч.-техн.конф. (Полтава, 29 нояб. 1979 г.). - М., 1979, с. 3-5.
48. Вульф, А.М. Резание металлов / А.М. Вульф // Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1973. – 496 с., ил.
49. Ильичев, Л.Л. Исследование влияния шлифовальных лент на параметры процесса шлифования: автореф.дис. ...канд. техн. наук: 05.03.03/ Ильичев Лев Леонидович. – М., 1975. - 20с.
50. Карпов, А.Б. Исследование взаимодействия зерна и связки шлифовальных инструментов при динамических нагрузках: автореф.дис. ...канд. техн. наук: 05.00.00 / Карпов Александр Борисович. – М., 1973. – 18с.
51. Коротков, А.Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов: Монография / А.Н. Коротков – Кемерово: КузГТУ, 2006.
52. Коротков, А.Н. Повышение работоспособности отрезных шлифовальных кругов / А.Н. Коротков, Г.М. Дубов // Кемерово: КузГТУ, 2005.
53. Ипполитов, Г.М. Абразивно-алмазная обработка / Г.М. Ипполитов // М.: Машиностроение, 1969. - 334 с.
54. Глейзер, Л. А. О сущности процесса круглого шлифования / Л. А. Глейзер — Сб.: Вопросы точности в технологии машиностроения – М.: Машгиз, 1959. — С. 91-95.
55. Резников, А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников// М.: Машиностроение, 1969 . – 288 с.
56. Флид, М.Д. Рациональное применение шлифовальных кругов при обработке инструментальных материалов / М.Д. Флид // М.: НИИМАШ, 1974.
57. Дорофеев, В.Д. Основы профильной алмазно-абразивной обработки / В.Д. Дорофеев // Изд-во Саратовского ун-та, 1983. - 186 с.

58. Гончаров, В.Д. Геометрические параметры алмазных зёрен. В кн.: «Теория и практика алмазной обработки» / В.Д. Гончаров, Л.Н. Лукин. - М.: НИИМАШ, 1969. - С. 10—13.
59. Семко, М.Ф. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб, М.Д. Узунян, М.С. Пивоваров. - Киев, «Техніка», 1978. - 192 с.
60. Основы проектирования и технологии изготовления абразивного и алмазного инструмента: учебное пособие для техникумов по специальности «Производство абразивного и алмазного инструмента» / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глаговский и др.; под общей ред. Ю.М. Ковальчука – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с., ил.
61. Каменцев, М.В. Искусственные абразивные материалы / М.В. Каменцев. - Л.: Машгиз, 1950. – 176 с.
62. Попов, С.А. Заточка режущего инструмента: учебное пособие для проф.-тех. училищ / С.А. Попов. - М., «Высш. школа», 1970. - 320 с., ил.
63. Редько, С.Г. Расположение абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга / С.Г. Редько, А.В. Королев // Станки и инструмент. – 1970. - № 5. - С. 40-41.
64. Гусев, В.В. Определение параметров рабочей поверхности алмазного круга при профилографировании [Электронный ресурс] / В.В. Гусев, Д.Б. Рожков // Современные металлорежущие системы машиностроения. Материалы 2-й Всеукраинской студенческой конференции. - Донецк 2-5 апреля 2001 г. Донецк: ДонГТУ, 2001. - С. 31-34.
65. Прохорова, Е.В. Совершенствование способа исследования параметров рабочей поверхности алмазных кругов методом профилографирования: магистерская работа.
66. Байкалов, А.К. Алмазный правящий инструмент на гальванической связке / А.К. Байкалов, И.Л. Суkenни. – Киев: Наукова думка. – 1976. – 202 с.

67. Редько, С.Г. Количество абразивных зерен шлифовального круга, участвующих в резании / С.Г. Редько // Станки и инструменты. – 1960. - № 12. – с. 10-12.
68. Резников, А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / А.Н. Резников // М., «Машиностроение». - 1977. - 391 с., ил.
69. Маслов Е.Н. Основы теории шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машгиз. – 1951. – 177 с.
70. Дитиненко, С.А. Условия уменьшения шероховатости обработки при шлифовании / С.А. Дитиненко, И.Н. Снисаренко, А.А. Машко, А.В. Черненко // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Машиностроение и машиноведение. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – С. 16-21.
71. Филимонов, Л.Н. Современные достижения высокоскоростного шлифования / Л.Н. Филимонов, В.Г. Степаненко // Ленинград: ЛДНТП, 1976. – 30 с.
72. Козлов, А.М. Определение параметров рабочей поверхности абразивного инструмента на основе моделирования / А.М. Козлов // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 2008. - № 1. – С. 51-56.
73. Багайсков, Ю.С. Формирование пористой структуры абразивных инструментов / Ю.С. Багайсков, В.М. Шумячер // Вестник СГТУ. – 2007.– Т. 1. – №2.– С. 31–37.
74. Калинин, Е.П. Анализ схемы расположения абразивных зёрен в объёме шлифовального круга / Е.П. Калинин, М.А. Шашков // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №6. – С. 136–140.
75. Носов, Н.В. Технологические основы проектирования абразивных инструментов / Н.В. Носов, Б.А. Кравченко // М.: «Машиностроение-1», - 2003. - 257 с.

76. Шумячер, В. М. Основы создания высокоэффективных абразивных инструментов / В. М. Шумячер, А. В. Славин, С. А. Крюков // Волгоград: ВолГАСУ, 2015. - 135 с.
77. Бакуль, В.Н. Синтетические алмазы в машиностроении / В.Н. Бакуль, Б.И. Гинзбург, Л.Л. Мишнаевский // Киев: Наук. Думка, 1976. – С. 350.
35. Родионова, О. В. Оптимизация процесса профильного шлифования кольца подшипника / О. В. Родионова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2016. - Т. 18, № 4 (2). - С. 378–382.
36. Воронов, В. А. Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Развитие методов моделирования / В. А. Воронов, И. А. Киселев, В. Ма, А. А. Ширшов // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. - 2015. - № 05. - С. 40–58.
37. Переладов А. Б., Камкин И. П. Определение силовых показателей взаимодействия абразивных зерен с заготовкой при шлифовании / А. Б. Переладов, И. П. Камкин // металлообработка. - 2015. - № 4 (88). - С. 13–18.
78. Носенко, В. А. Основные закономерности формирования рабочей поверхности круга при шлифовании / В. А. Носенко, Е. В. Шевцова // . – 2009. – № 8. – С. 95-100.
79. Рыжов, Э.В. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильинский, И.Х. Чеповецкий. – Киев: Наук. думка, 1979. – 244 с.
80. Сагарда, А.А. Анализ причин износа алмазно-абразивного инструмента / А.А. Сагарда // Технология и орг. Пр-ва, 1968. - №2. - с.54-57.
81. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак // М., «Машиностроение», 1974. - 280 с., ил.
82. Мишнаевский, Л. Л. Износ шлифовальных кругов / Л. Л. Мишнаевский – Киев: Наук. думка, 1982. – 192 с.

83. Осипов А. П. Исследование влияния касательных напряжений сдвига на процесс износа абразивного инструмента / А. П. Осипов, В. В. Федотов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2005. – № 32. – С. 110-118.
84. Оробинский, В.М. Оценка режущей способности абразивных кругов при шлифовании с непрерывной поперечной подачей / В.М. Оробинский, В.В. Воронцов, А.Н. Воронцова, Л.Г. Гильдебранд. // СТИН, 2002. - №3.- с. 23-26.
85. Степанов, Ю.С. Моделирование микрорельефа абразивного инструмента и обработанной поверхности / Ю.С. Степанов, Е.А. Белкина, Г.В. Барсуков // Москва: Машиностроение -1, 2004.- 215 с.
86. Кузьмичева, Г.М. Теория плотнейших шаровых упаковок и плотных шаровых кладок / Г.М. Кузьмичева / М.: МИТХТ. - 2000. - 36 с.
87. Маслов, С.С. Оптимизация технологии глубинного шлифования / С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков и др.; – М.: Машиностроение, 1989. – 120с., ил.
88. Зайцев, А.Г. Расчет числа зерен, ориентировано расположенных на рабочей поверхности шлифовального круга / А.Г. Зайцев // Сверхтвердые материалы, 1982 г. - №6. - с. 41-44.
89. Кузнецов, А. М. Влияние геометрических параметров синтетических алмазных зерен на их режущие свойства / А. М. Кузнецов, М. П. Голосов // Станки и инструмент. – 1964. – № 12. – С. 28–29.
90. Ящерицын, П.И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев // Минск: Наука и техника, 1972. - 384 с.
91. Ягьяев, Э. Э. Анализ методов описания рельефа рабочей поверхности шлифовальных кругов для разработки систем диагностики и управления процессом шлифования / Э. Э. Ягьяев, В. Б. Богуцкий, Л. Б. Шрон // Ученые

- записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2019. – № 3(65). – С. 280-286.
92. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. М., «Машиностроение», 1977.
93. Крюков, С.А. Определение объемно-размерных параметров пористости шлифовальных кругов / С.А. Крюков, Н.В. Байдакова, В.М. Шумячер // Машиностроение и компьютерные технологии. - 2018. - № 05. - С. 1–8.
94. Кремень, З. И. Выбор характеристик абразивных кругов для основных видов шлифования / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин // Под ред. Ю. М. Зубарева. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2003. – 60 с.
95. Попов, С.А. Особенности контактного взаимодействия эльборового абразивного инструмента с обрабатываемым материалом / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Н.В. Барина // Физико-химические явления при шлифовании. - Киев: ИПМ АН УССР, 1976. – С. 3-10.
96. Малкин, С. Износ шлифовальных кругов / С. Малкин, Н.Х. Кук // Конструирование и технология машиностроения, 1971. - № 4. – С. 237-252.
97. Физические величины. Справочник. Под редакцией И.С. Григорьева – Москва. Энергоатомиздат, 1991. – С. 1232.
98. Филимонов, Л.Н. Плоское шлифование / Л.Н. Филимонов // Ленинград: Машиностроение, 1985. – С. 109.
99. Осипов, А. П. Моделирование шероховатой поверхности методом суперпозиции относительных опорных кривых / А. П. Осипов // Вестник Сам. гос. тех. ун-та, серия «Физико-математические науки», 2002. – с.168 – 175.
100. Курбатова, Н. В. Конечно-элементное моделирование в ANSYS, математическое моделирование и вычислительная математика, трехмерное тело неканонической формы / Н. В. Курбатова, А. В. Наседкин // Навигатор в мире науки и образования. – 2017. – № 2(35). – С. 58.

101. Богданов, С.П. Модуль Юнга корундовой керамики, спеченной из порошков со структурой «ядро-оболочка», синтезированных методом йодного транспорта / С.П. Богданов, В.В. Козлов, А.П. Шевчик, А.С. Долгин // Научные исследования и разработки. – 2019. - № 8(2019). – С. 55-58.
102. Осипов, А. П. Теоретические исследования влияния характеристик абразивного инструмента на параметры его рабочей поверхности / А. П. Осипов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 6. – С. 234-237.
103. Зубарев, Ю. М. Динамическая модель системы единичного абразивного зерна в шлифовальном круге / Ю. М. Зубарев, М. А. Алейникова // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2016. – № 6(231). – С. 40-43.
104. Ваксер, Д.Б. Влияние геометрии абразивного зерна на свойства шлифовального круга / Д.Б. Ваксер; Сб. «Основные вопросы высокопроизводительного шлифования» под ред. Е.Н. Маслова. – М.: Машгиз, 1960.
105. Костенков, С.А. Повышение работоспособности галтовочных тел на основе применения зерен с контролируемой формой: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.03.01 / Костенков Сергей Александрович. - Томск, 2007.- 21 с.
106. Федотов, В.В. К вопросу об определении количества режущих абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга / В.В. Федотов, Е.С. Киселев, А.П. Осипов // СТИН. – 2023. – №1. – с. 15-18
107. Дубинкин, Д.М. Повышение эксплуатационных возможностей обдирочных кругов путем использования шлифовальных зерен с контролируемой формой: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.03.01 / Дубинкин Дмитрий Михайлович. - Томск, 2009.- 17 с.
38. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов // - М.: Машиностроение, 1981. - 184 с.

108. Люкшин, В.С. Повышение работоспособности шлифовальных лент путем использования шлифовальных зерен с контролируемой формой: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.03.01 / Люкшин Владимир Сергеевич. - Томск, 2007.- 20с.
109. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев // 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, гл. ред. физ.- мат. лит., 1986.- 544 с.
110. Евсеев, Д.Г. Модели шлифования. Теория и эксперимент: монография / Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников // – М.: ФГУП Издательство «Известия», 2018. – 312 с.
111. Худобин, Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин; под ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.
112. Булошников, В. С. Модель режущей поверхности алмазного круга / В. С. Булошников // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 10. – С. 2.
113. Кальченко, В. И. Моделирование процесса резания единичным абразивным зерном при круглом глубинном шлифовании / В. И. Кальченко, О. Л. Деркач, Я. В. Кужельный // Технические науки и технологии. – 2017. – № 2(8). – С. 29-39.
114. Худобин, Л.В. Пути совершенствования технологии шлифования. Саратов, Приволж. кн. изд., 1969. – С. 213, ил.; табл.
115. Люкшин, В. С. Экспериментальное определение количества абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовальных инструментов / В. С. Люкшин, Д. Б. Шатько, С. Ю. Заруцкий // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 14–17 октября 2019 года / Редколлегия: Д.М. Дубинкин [и др.]. – Кемерово: Кузбасский

- государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 192-194.
116. Коротков, А. Н. Влияние формы абразивного зерна на режущую способность и износ шлифовальных кругов / А. Н. Коротков, А. А. Цехин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 1999. – № 2(9). – С. 17-19.
117. Ящерицын, П.И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованной поверхности / П.И. Ящерицын // Минск, «Наука и техника», 1966.
118. Носенко, В. А. Математическая модель формирования рабочей поверхности абразивного инструмента при шлифовании / В. А. Носенко // Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий: Материалы Международной конференции и Российской научной школы. – Москва: НИИ "Автоэлектроника", 1999. – С. 131-133.
119. Свитковский, С. Ю. Исследование закономерностей и повышения эффективности процесса шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов / С. Ю. Свитковский, Т. Н. Иванова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2004. – № 1(21). – С. 22-24.
120. Кочкина, Ю. С. Исследование влияния формы и ориентации единичного шлифовального зерна на его режущую способность / Ю. С. Кочкина, В. С. Люкшин // Россия молодая: Сборник материалов VI всероссийской, 59-й научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Кемерово, 22–25 апреля 2014 года / Ответственный редактор: Блюменштейн В.Ю.. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2014. – С. 165.
121. Глейзер, Л.А. О сущности процесса шлифования: в 2-х томах: дис. ... доктора техн. наук: 05.00.00 / Глейзер Леонид Акимович. - М., Станкин, 1956.
122. Королев, А. В. Комбинированный способ шлифования-доводки качающимся кругом / А. В. Королев, С. И. Капильник, Д. Г. Евсеев; Под ред. А. В. Королева.-Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983 (вып. дан. 1984).-96 с.: ил.

123. Нефедкин, А. И. Исследование закономерностей воздействия абразивных зерен хонинговых брусков на поверхность обрабатываемой детали / А. И. Нефедкин, И. В. Одинокова // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2018. – № 2(84). – С. 37-43.
124. Городецкая, О. С. Тенденции развития и анализ основных экономических тенденций развития машиностроения в Российской Федерации / О. С. Городецкая // Economic aspects of industrial development in the transition to a digital economy : Сборник научных статей по материалам IV Международной научно-практической конференции, Уфа, 25 декабря 2020 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2020. – С. 120-128.
125. Маслов, А. Р. Резание металлов в автоматизированном производстве: Учебное пособие для бакалавров / А. Р. Маслов. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. – 300 с.
126. Переладов, А. Б. Высокопроизводительное шлифование закаленных стальных деталей нефтепромышленного оборудования / А. Б. Переладов // Трубопроводная арматура XXI века: наука, инжиниринг, инновационные технологии : материалы 1-ой Международной научно-технической конференции, Курган, 24–26 сентября 2008 года / Администрация (правительство) Курганской обл. и др.; отв. ред. В. П. Кузнецов. – Курган: Курганский государственный университет, 2008. – С. 241-244.
127. Курдюков, В.И. Основы абразивной обработки: учебное пособие / В.И. Курдюков // Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. - 195 с.
128. Гаршин, А. П. Материаловедение. В 3 т. Том 1. Абразивные материалы : учебник для академического бакалавриата / А. П. Гаршин, С. М. Федотова ; под общ. ред. А. П. Гаршина. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 214 с. — Серия : Университеты России.

129. Полканов, Е. Г. Прогнозирование прочности шлифовального круга по прочности исходной абразивной массы / Е. Г. Полканов, Н. А. Горин // Современные тенденции технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2014 г.). – Казань: Бук, 2014. – с. 53-55
130. Крюков, С. А. Шлифовальные инструменты с наполнителями и из смесей абразивов разных по форме и зернистостям : для бакалавриата и магистратуры / С. А. Крюков, Н. В. Байдакова, А. И. Мироседи, Е. М. Ревзина ; Под общей редакцией Шумячера В.М.. – Санкт-Петербург : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2018. – 155 с.
131. Осипов, А. П. Программное обеспечение для исследования геометрии абразивных зерен / А. П. Осипов // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2012. – № 2(19). – С. 141-148.
132. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям / Н.Ш. Кремер. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 551 с.
133. Федотов, В. В. Экспериментальное определение штучной плотности абразивного материала / В. В. Федотов, А. П. Осипов, Е. С. Киселев // Инновации в машиностроении (ИнМаш - 2021) : Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Рахимянова Хариса Магсумановича, Новосибирск, 07–09 октября 2021 года / Под редакцией С.И. Василевской, Ю.С. Кудрявцевой. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. – С. 232-241.
134. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп.: Металлургия, 1986. - 480 с.
135. Кальнер, В. Д. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: Справочник/ под общ. ред. В. Д. Кальнера. – «Машиностроение», 1984. – 384 с., ил.

136. Вершина, А. К. Материаловедение, раздел «Термическая обработка»: лабораторный практикум по одноименному курсу для студентов технологических и химических специальностей / А. К. Вершина, Н. А. Свидуневич, Д. В. Куис // – Минск : БГТУ, 2008. – 75 с.
137. Термическая обработка сталей: метод. указания / сост. О. К. Колеров, В. С. Уварова, И. А. Дроздов, Г. З. Бунова. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2008 - 68 с.
138. Барышев, Г.А. Материаловедение: конспект лекций. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 140 с.
39. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения.
40. Ефименко, Л. А. Металловедение и термическая обработка сварных соединений: Учебн. пособие / Л. А. Ефименко, А. К. Прыгаев, О. Ю. Елагина // - М.: Логос, 2007. - 456 с.
41. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры.
42. Кроха, В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации / В.А. Кроха // Машиностроение, 1968. – С. 131.
43. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 - Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения.
44. Боровский, Г. В. Справочник инструментальщика / Г. В. Боровский, С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов; под общ. ред. А. Р. Маслова. – Москва, 2007.
45. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания. Часть II. Нормативы режимов резания. - М.: Экономика, 1999. - 474 с.
46. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов: методические указания. - М.: Изд. стандартов, 1978. - 64 с.
47. Худобин, Л. В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин; под. ред. Л. В. Худобина. - Ульяновск : УлГТУ, 2007. - 298 с.

48. Валеев, Г.Х. Регрессионное моделирование при обработке данных / Г.Х. Валеев // - Казань: ФЭН, 2001.- 296 с.
49. Худобин, Л.В. Курсовые и дипломные проекты с развитой научно-исследовательской частью: учебное пособие / Л.В. Худобин, В.Ф. Гурьянихин, В.Р. Берзин. - Ульяновск: УлГТУ, 1998. - 84 с.
50. Stachurski, W. An effect of grinding on microhardness and residual stress in 20MnCr5 following single-piece flow low-pressure carburizing / Stachurski W., Krupanek K., Januszewicz B., Rosik R., Wojcik R. // Journal of machine engineering. 2018. Vol. 18, no. 4. Pp. 73–85.
51. Wojcik, R. Effects of thermo-chemical treatment and grinding process of external cylindrical surfaces on residual stresses in 13CrMo4-5 steel / Wojcik R., Sawicki J. // Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. 2023. Vol. 120 (1). Pp. 10–21
52. Wang, L. Mechanism of grinding-induced burns and cracks in 20CrMnTi steel gear / Wang L., Tang X., Wang Li., Yang N., Chen X., Li P., Liu G., Liu Gu. // Materials and manufacturing processes. 2019. Vol. 34 (10). Pp. 1143–1150.
53. Neslusan, M. Monitoring of grinding burn via Barkhausen noise emission in case-hardened steel in large-bearing production / Neslusan M., Cizek J., Kolarik K., Minarik P., Cillikova M., Melikhova O. // Journal of materials processing technology. 2017. Vol. 240. Pp. 104–117.
54. Sawicki, J. The influence of grinding conditions on the distribution of residual stress in the surface layer of 17CRNI6-6 steel after carburizing / Sawicki J., Kruszynski B., Wojcik R. // Advances in science and technology research journal. 2017. Vol. 11 (2). Pp. 17–22.
55. Stachurski, W. The influence of the depth of grinding on the condition of the surface layer of 20MnCr5 steel ground with the minimum quantity lubrication (MQL) method / Stachurski W., Januszewicz B., Sawicki J. // Materials. 2022. Vol. 15 (4). Pp. 1336-1–1336-20.

56. Dobrocky, D. Quality evaluation of carburized surfaces of steels used in military technology / Dobrocky D., Joska Z., Studeny Z., Pokorny Z. // Manufacturing Technology. 2020. Vol. 20, no. 2. Pp. 152–161.
57. Hong, Yu. Grinding residual stress optimization under the micro-carburizing effect / Hong Yu., Sun C., Xiu Sh., Xua Ch., Liang D., Deng Ya. // Tribology international. 2023. Vol. 188, no. 108807.
58. Sun, C. Surface strengthening mechanism of the active grinding carburization / Sun C., Hong Yu., Xiu Sh., Liang M., Wangc D., Xua Ch., Feng W. // Tribology international. 2023. Vol. 185, no. 108569.
59. FURUHARA, T. Phase Transformation from Fine-grained Austenite / FURUHARA T., KIKUMOTO K., SAITO H., SEKINE T., OGAWA T., MORITO S., MAKI T. // ISIJ International, Vol. 48 (2008), No. 8, pp. 1038–1045.
60. Dubovska, R. Qualitative aspects of machined surfaces of high strength steels / Dubovska R., Jambor J., Majerik J. // Procedia engineering. 2014. Vol. 69. Pp. 646–654.
61. Dubovska, R. Phisico-chemical state stabilization of high strength steels machined surface / Dubovska R., Majerik J., Chochlikova H. // Proceedings in manufacturing systems. 2011. Vol. 6 (2). Pp. 75–80.
62. Zgorniak, P. The influence of grinding wheel type on microhardness and residual stresses in vacuum-carburised 20MnCr5 steel using the single-piece flow method / Zgorniak P., Wolowiec-Korecka E., Januszewicz B., Sikora M., Rosik R. // IOP conference series: materials science and engineering. 2020. Vol. 743. Pp. 012049-1–012049-7.
63. Lerra, F. Surface integrity evaluation within dry grinding process on automotive gears / Lerra F., Grippo F., Landi E., Fortunato A. // Cleaner engineering and technology. 2022. Vol. 9. Pp. 100522-1–100522-9.
64. Watanabe K. Engineering (Japan)/ 1957, N2, N3, N4, N5, N6
65. Landberg «Microtechnic» (Швейцария), 1975, N 1

66. Lebedev, V. MARTENSITE TRANSFORMATIONS IN THE SURFACE LAYER AT GRINDING OF PARTS OF HARDENED STEELS / Lebedev V., Klimenko N., Uryadnikova I., Chumachenko T., Ovcharenko A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774 3/12 (87), 2017.
67. Bezpalo, A. INVESTIGATION AND ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF DIFFUSIONLESS PHASE TRANSFORMATIONS IN THE SURFACE LAYER OF A PART UNDER THE ACTION OF GRINDING TEMPERATURES / Bezpalo A., Lebedev V., Klimenko N., Uryadnikova I., Chumachenko T. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774/12 (94), 2018.
68. Opilz, H. Untersuchung. der Eigenschaften von Schleifkoerpern und ihr Verhalten im Schleifvorgang / Opilz H., Peklenik J., Bruckner K. // Koeln und Opladen: Westdeutscher Verlag, 1964. - 63 c.
69. Rodlike abrasive shapes better wheel performance / Gohn C., Mc. Mullen., «Steel», 1962. - №18. - 151c.
70. Koning, W. Three dimensional measurement of the grinding wheel surface-evaluation and effect of cutting behavior / Koning W., Lortz W // CIRP Ann., 1976, 25, N 1, p. 197-202.
71. Huo, W. Finite element analysis on single abrasive grinding Ti6Al4V alloy / Huo W., Zhang X., Dong Q., Shao J. // Key engineering materials. 2018. Vol. 764. Pp. 184–193.
72. Anderson, D. Experimental and numerical investigations of single abrasive-grain cutting / Anderson D., Warkentin A., Bauer R. // International journal of machine tools & manufacture. 2011. Vol. 51 (12). Pp. 898–910.
73. Doman, D.A. Finite element modeling approaches in gridding / Doman D.A., Warkentin A., Bauer R. // International journal of machine tools and manufacture. 2009. Vol. 49 (2). Pp. 109–116.
74. Rupina, L. Influence of the geometrical features of the cutting edges of abrasive grains on the removal efficiency of the Ti6Al4V titanium alloy / Rupina L.,

- Lipinski D., Banaszek K., Kacalak W., Szafraniec F. // *Materials*. 2022. Vol. 15. Pp. 6189-1–6189-21.
75. Li, L. Mechanical behavior and modeling of grinding force: A comparative analysis / Li L., Zhang Ya., Cui X., Said Z., Sharma Sh., Liu M., Gaoa T., Zhou Z., Wang Xi., Li Ch. // *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 102. Pp. 921–954.
76. Arrazola, P.J. Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining / Arrazola P.J., Ozel T. // *International journal of mechanical sciences*. 2010. Vol. 52 (1). Pp. 31–42.
77. <https://sm-volga.ru/universalnaya-polusinteticheskaya-sozh/coolant-universalnaya-polusinteticheskaya-sozh.html>

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор АО «КАРДАН»

Трифонов Е.С.

«26» августа 2024 г.



**АКТ**

**внедрения результатов диссертационной работы  
Федотова Виктора Васильевича, выполненной на тему  
«Повышение эффективности шлифования цементированных заготовок путем  
рационального выбора условий обработки и характеристики абразивного  
круга»**

Комиссия АО «КАРДАН» в составе генерального директора Трифонова Е.С. и технического директора Полубанова А.Ю. рассмотрела вопрос об использовании результатов диссертационной работы Федотова Виктора Васильевича и установила следующее:

В рамках технологического процесса изготовления крестовин шарниров карданных валов в условиях АО «КАРДАН» после термической обработки цементацией шипов детали осуществляется операция бесцентрового шлифования на итальянском станке Pomini Farrell Giustina International 267. В качестве основного абразивного инструмента на данном этапе механической обработки используются круги типа 1\* 600\*22\*305 со следующей характеристикой: 92A F150 O 8 V5.

По результатам проведенного в диссертационной работе экспериментального исследования наиболее хорошие показатели качества обработанных поверхностей по параметрам содержания цементита в поверхностном слое, остаточным напряжениям III рода, шероховатости и волнистости поверхности, а также по величине микротвердости поверхностного слоя были получены при использовании режимов шлифовальной операции с врезной подачей  $V_s=2,5$  мм/мин, рабочей скоростью круга  $V_k = 50$  м/с, временем выхаживания  $\tau=1$  с. При проведении данного эксперимента использовались круги 12 номера структуры.

В связи с этим, разработанные в рамках диссертационного исследования технологические рекомендации по изменению режим резания и характеристики абразивного круга, внедрены в производственный процесс операции бесцентрового шлифования шипов крестовин шарниров карданных валов на АО «КАРДАН».

Генеральный директор Трифонов Е.С.

Технический директор Полубанов А.Ю.

«УТВЕРЖДАЮ»



Генеральный директор АО «Кардан»

Трифонов Е.С.

«26» августа 2024 г.

Расчет

**ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов диссертационного исследования «Повышение эффективности шлифования цементированных заготовок путем рационального выбора условий обработки и характеристики абразивного круга»**


На базе АО «КАРДАН» внедрена новая методика назначения элементов режима резания на этапе технологической подготовки операции шлифования цементированных заготовок на примере производства шипов крестовин шарниров карданных валов. Взамен существующего подхода (поиск данных в каталогах режущего инструмента, выбор на основании личного опыта) внедрено приложение автоматического назначения режима резания на каждый планируемый переход. В свою очередь это позволило ускорить процесс ТПП за счёт минимизации труда инженера-технолога, а также сократить машинное время производства детали за счет более рационального выбора условий обработки и характеристик абразивного круга.

**Основные технико-экономические показатели внедрения результатов исследования**

Наименование показателя	Единицы измерения	Обозначение	Значение показателя базового ТП	Значение показателя нового ТП
Годовая программа выпуска деталей	шт.	$\Pi$	465122	465122
Основное машинное время шлифовальной операции	с	$t_{\text{о.шл}}$	12,36	9,56
Изменение основного машинного времени шлифовальной операции	с	$\Delta t_{\text{о.шл}}$	0	- 2,8
Трудоемкость шлифования одной детали	с	$T_{\text{шл}}$	56,96	54,16
Относительное изменение трудоемкости шлифования одной детали	%	$\Delta T_{\text{шл}}$	0	- 4,92

Годовая трудоемкость шлифования деталей	ч	$T_{год.мл}$	7359,08	6997,5
Снижение годовой трудоемкости шлифования деталей	ч	$\Delta T_{год.мл}$	0	361,58
Годовая экономия	руб.	$\Delta \mathcal{E}_{полн.мл}$	0	1320000

Ожидаемый годовой экономический эффект на этапе ТПП и механической обработки крестовин шарниров карданных валов от внедрения результатов диссертационного исследования «Повышение эффективности шлифования цементированных заготовок путем рационального выбора условий обработки и характеристики абразивного круга» составил для предприятия 1.320.000 (один миллион триста двадцать тысяч) рублей.

  
 Генеральный директор Трифонов Е.С.

Заместитель генерального директора  
 по экономике Шмелева Т.Ф.

