

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН  
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика М.С. Осими**

*На правах рукописи*



УДК621.923.9

**ХОЛЗОДА Фаридун Бури  
(ХОЛОВ Фаридун Буриевич)**

**ОБРАБОТКА ШАРИКОВ ИЗ ПОЛУДРАГОЦЕННЫХ И ПОДЕЛОЧНЫХ  
КАМНЕЙ НА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СТАНКАХ**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание ученой степени доктора философии (PhD),  
доктора по специальности 6D071200 – Машиностроение (6D071206 –  
Машины, агрегаты и процессы (6D071206-01 – технические науки))**

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

Мирзоалиев Исройл

Душанбе – 2025 г.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....</b>	<b>7</b>
<b>Глава 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>14</b>
1.1. Способы центробежной абразивной обработки, их анализ.....	14
1.2. Анализ способов абразивной обработки.....	15
1.2.1. Способы абразивной обработки.....	15
1.3. Размерная абразивная обработка.....	17
1.4. Безразмерная абразивная обработка.....	20
1.5. Способы центробежно - абразивной обработки и её виды.....	22
1.6. Самоцветные камни и их свойства.....	26
1.7. Анализ технологий производства шариков из полудрагоценных и поделочных камней.....	30
1.8. Применение центробежных абразивных технологий в обработке полудрагоценных и поделочных камней.....	33
1.9. Сущность и особенности метода многодисковой центробежно - абразивной обработки шариков.....	35
1.9.1. Основные схемы и принцип работы.....	35
1.10. Заключение по литературному обзору.....	37
<b>Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ.....</b>	<b>38</b>
2.1. Взаимодействия элементов загрузки при многодисковой центробежно абразивной обработки.....	38
2.2. Влияние количества абразива на производительность обработки.....	44
2.3. Особенности формообразования шаровидных изделий на галтовочном барабане с канавками.....	45
2.4. Разработка оборудования и технологий формирования шаровидных элементов из полудрагоценных и поделочных материалов.....	50

2.5. Исследование абразивной галтовки кубических заготовок из полудрагоценных и поделочных камней в центробежных барабанах с подвижным дном.....	53
2.6. Формирование сферических изделий из полудрагоценных и поделочных камней методом центробежной обработки.....	56
2.7. Центробежная абразивная шлифовка и полировка сферических элементов.....	68
2.8. Способ обработки на многодисковом галтовочном станке.....	72
2.9. Заключение к главе II.....	75
<b>Глава 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....</b>	<b>77</b>
3.1. Оборудование, образцы, применяющиеся при экспериментальном исследовании процесса обработки.....	77
3.2. Методика проведения эксперимента на многодисковом центробежно – абразивном станке.....	80
3.3. Методика метрологических исследований.....	82
3.3.1. Методика исследование минералогического состава самоцветных камней используемых в работе.....	82
3.3.2. Измерение некруглости.....	84
3.3.3. Измерение шероховатости поверхности.....	95
3.4. Методика проведения экспериментов и обработка экспериментальных данных.....	97
3.4.1. Методика обработки экспериментальных данных.....	99
3.4.2. Статистическая обработка экспериментальных данных.....	100
3.5. Заключение к главе III.....	103
<b>Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ НА МНОГОДИСКОВОМ СТАНКЕ.....</b>	<b>106</b>
4.1. Анализ минералогического состава полудрагоценных и поделочных камней используемых в работе.....	106

4.2. Эксперименты и анализ результатов обработки.....	111
4.2.1. Исследование величины съема от продолжительности обработки	111
4.2.2. Влияние линейной скорости инструмента на производительность обработки.....	114
4.2.3. Исследование влияние режимов обработки на точность формы....	116
4.3. Центробежное объемное шлифование.....	119
4.4. Исследование шероховатости поверхностей при центробежном объемном шлифовании.....	122
4.5. Сравнительный анализ.....	124
4.5.1. Сравнение способов обработки по производительности.....	124
4.6. Заключение к главе IV .....	125
<b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ .....</b>	<b>127</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>129</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....</b>	<b>145</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>	<b>150</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>154</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>	<b>160</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>	<b>163</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....</b>	<b>166</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Работа посвящена комплексному исследованию процесса изготовления шариков из полудрагоценных и поделочных камней с применением метода центробежной абразивной обработки.

Существующие технологии обработки самоцветных камней в ювелирном производстве основаны на единичном и мелкосерийном производстве и как следствие этого являются малопроизводительными. Доля ручного труда при этом высока и не отвечает современным требованиям. Большая потребность в ювелирных изделий из самоцветных камней требует усовершенствование технологии их производства и разработке более производительных способов их обработки. Один из таких способов обработки является центробежная абразивная обработка. Нами разработаны и исследованы новые способы центробежной обработки самоцветных камней, на которых получены патенты на изобретения. Основными элементами большинства изделий из самоцветных камней является шарики различных диаметров. В данной работе проведено исследование процессов центробежной обработки шариков из самоцветных камней, позволяющих достичь высокой производительности и качества обработки.

Драгоценные и полудрагоценные камни характеризуются высокой твёрдостью, но при этом остаются хрупкими. В связи с этим при их обработке необходимо исключать воздействие ударных нагрузок. Этим требованиям в полной мере соответствуют методы центробежной абразивной обработки и технологические процессы, разработанные на их основе.

**Актуальность** исследования вызвана тем, что наша республика имеет огромные запасы недостаточно неиспользуемых месторождений самоцветных камней. Основная причина недостаточного использования этих камней в ювелирной промышленности является низкая производительность применяемого оборудования и большая трудоемкость применяемых технологий обработки. Большинство существующие технологии основаны на единичном и

мелкосерийном производстве изделий, что оправдывает себе при обработке драгоценных камней.

Объём производства изделий из цветных камней значительно превышает выпуск продукции из полудрагоценных, однако их удельная стоимость остаётся ниже. Повышение производительности обработки является ключевым фактором для снижения себестоимости и увеличения рентабельности производства. На сегодняшний день основным способом изготовления изделий из самоцветных камней остаются методы абразивной обработки. Абразивная обработка считается одной из наиболее важных стадий обработки поверхности изделий.

С помощью представленных твердых абразивов можно выполнять такие операции, как шлифовка, полировка, обработка, хонингование, суперфиниширование и т.д. Их используют как в заготовительном производстве, так и в ходе финишной обработки металлических или природных материалов. В представляющей диссертационной работе исследованы производительности различных методов галтовки, в том числе существующих и вновь разрабатываемых. Установлено, что наиболее перспективными методами галтовки при обработке самоцветных камней являются методы центробежной абразивной обработки. Производительность и качеству обработки можно существенно улучшить применением этих методов. Исходя из этого можно заключить, что разработка оборудование и технологии основание на применение метода центробежной абразивной галтовки являются актуальными.

**Степень разработанности работы.** Работа завершена полностью, в том числе выполнены теоретические и экспериментальные исследования процесса обработки самоцветных камней с использованием центробежных методах обработки. Разработаны и изготовлены станки для центробежной абразивной обработки, на которых получены патенты на изобретения. Результаты исследования внедрены в учебном процесса и ООО «Рухом» г. Душанбе.

**Связь работы с научными программами, темами.** Исследования, представленные в диссертации, непосредственно связаны с научным

направлением кафедры технологии машиностроения, металлорежущие станки и инструменты ТТУ имени академика М. С. Осими, Национальной стратегии развития РТ на период до 2030 года (№636, от 01.12.2016 г.), Закон РТ о драгоценных металлах и драгоценных камнях (№215, от 06.05.2006 г.) и Программе развития машиностроительной промышленности РТ на 2020-2025 годы (№527, от 29.09.2020 г.).

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Целью диссертационной работы является повышение производительности процесса изготовления шариков из самоцветных камней путём совершенствования оборудования и технологии производства.**

**Задачи диссертации** заключается в решение следующем:

- разработка оборудование и технологической оснастки позволяющая из кубиков, нарезанных из самоцветных камней без промежуточной обработки образовать шаровидных заготовок;
- изучение кинематики и динамики процесса обработки шариков с целью определение основных факторов влияющие на параметры процесса обработки;
- проведение многофакторных экспериментов по выявление взаимосвязей режимов обработки и производительности процесса;
- проанализированы потенциалы многоинструментальной центробежной абразивной обработки для достижения высокой производительности и обеспечения качества обработки изделий из самоцветных камней;
- определены оптимальные области применения метода многоинструментальной центробежной абразивной обработки для обработки твёрдых и хрупких материалов.

**В качестве объекта исследования** в данной работе рассматриваются станки для центробежной абразивной обработки шаровидные изделия из самоцветных камней, режимы обработки на многоинструментальном центробежном станке.

**Предметом исследование** является самоцветные полудрагоценные камни: аметист, офит, лазурит, оникс и т.п.

**Методология и методы исследования.**

**Для решения поставленных задач используется следующие методы исследования:**

- метод анализа, классификации и упорядочения исходной информации;
- методы экспериментального исследования процессов формообразования шариков;
- статистические методы планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных;
- сравнительно-сопоставительный метод оценки результатов;
- технические решения вопроса повышение производительности обработки.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в:

- предложен и исследован новый способ многоинструментальной центробежной абразивной обработки, обеспечивающий повышение производительности процесса и улучшение качества обработанных поверхностей изделий;
- разработан многоинструментальный станок, позволяющая из кубиков нарезанных из самоцветных камней без промежуточной обработки формировать шарвидные заготовки (малый патент №ТJ 1361);
- получены расчетные формулы, позволяющие в зависимости от режимов обработки рассчитать производительность обработки и точности формы шариков из самоцветных камней;
- предложены новые конструкторско-технологические решения по проектированию и созданию оборудования для обработки изделий из цветных камней, способствующие увеличению эффективности процесса и улучшению качества готовой продукции;
- выявлены закономерности между режимами обработки и производительностью процесса, что позволяет определить объемы потерь массы заготовок и, соответственно, более точно рассчитывать необходимое качество сырья для изготовления заданного количества изделий;

- исследованы зависимости шероховатости поверхности от режимов обработки, что дает возможность управлять качеством изделия на стадии их изготовления;

- статистической обработкой результатов многофакторных экспериментов получены математические модели процесса обработки.

**Теоретическая значимость работы** заключается в следующем:

- исследование кинематики и динамики процесса обработки на центробежных станках различного типа;

- проведена оценка влияния технологических факторов на производительность процесса, результаты которой представлены в форме математических моделей, сформированных на основе многофакторного экспериментального планирования и последующего статистического анализа полученных данных;

- полученные уравнения зависимости производительности от режимов обработки позволяющие определить потери массы заготовок для получения готовых изделий в зависимости от режимов обработки, что дает возможность определить исходную массу заготовок, и необходимое сырье для производство запланированное количество изделий;

- разработке рекомендации для определения области эффективного применения оборудования и технологической оснастки, работающие по принципу центробежной абразивной обработки.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

- разработан способ многоинструментальной центробежной абразивной обработки, позволяющий одновременно обработать заготовки из самоцветных камней с различными физико-химическими свойствами;

- результаты работы можно использовать для выполнения операции удаление заусенцев и округление острых граней заготовок из различных материалов, выполняемых вручную (слесарные операции), также на предприятиях, изготавливающих ювелирные изделия из самоцветных камней;

- разработано высокопроизводительное оборудование позволяющий из исходных заготовок в виде кубиков нарезанных из самоцветных камней без

промежуточной обработки образовать шаровидных заготовок, его можно применять в ювелирном производстве при изготовление изделий из самоцветных камней;

- установлены влияние ключевых факторов, влияющих на паровые процессы обработки, на производительность обработки и качество поверхностей;
- изготовлен специальный многоинструментальный станок, на котором проведены экспериментальные исследования и получены положительные результаты.

**На защиту выносятся следующие основные результаты:**

- разработана и реализовано устройство для многоинструментальной центробежной абразивной обработки сферических изделий из самоцветных камней, обеспечивающее высокую производительность процесса (малый патент №1361);
- установлены аналитические зависимости, описывающие динамику формообразования шаровидных заготовок в зависимости от параметров режима обработки;
- получены эмпирические зависимости, устанавливающие связь между технологическими параметрами обработки и такими характеристиками, как производительность, точность формы и качество поверхности;
- установлено влияние основных факторов обработки на параметр шероховатости и коррекцию геометрии шаров при центробежной абразивной обработке.

**Степень достоверности результатов исследований. Высокая достоверность полученных результатов** обеспечивается применением современной экспериментальной базы, использованием точного измерительного оборудования, а также значительным объемом собранных данных, обработанных с помощью методов математической статистики и теории вероятностей. Экспериментальные данные демонстрируют хорошее согласие с ранее опубликованными результатами, что дополнительно подтверждает их надежность.

**Отрасль исследования.** Обработка камней требует высокой точности и аккуратности. Обработка камней на центробежных станках в рамках машиностроения относится к некоторым важным направлениям отрасли:

- разработка и совершенствование технологии центробежной обработки камней как заготовок или изделий;
- конструирование, расчет центробежных станков для обработки мелких изделий (шариков) из твердых, хрупких, неметаллических материалов;
- оптимизация параметров обработки как скорость вращения, вид абразивной среды, сила прижатия, продолжительность обработки и др;
- повышение качества обработки (например, полировка, снятие заусенцев, шлифовка).

**Этапы исследования. Диссертационное исследование проводилось в период с 2019 по 2024 годы и включало следующие этапы:**

- анализ состояния вопроса и задачи исследования;
- исследование способов центробежной абразивной обработки;
- методика проведения и обработки результатов экспериментов;
- исследование процесса центробежно-абразивной обработки шариков на многодисковом станке.

### **Информационная и лабораторная база исследования.**

Для проведения исследования была использована разнообразная информационная база, включающая научные диссертации, статьи из периодических научных журналов и материалы конференций, интернет ресурсы, а также материалы республиканской научно-технической библиотеки национальный патентно-информационный центр (НПИ Центр). Диссертационная работа выполнена на кафедре технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты ТТУ имени академика М.С. Осими.

**Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 6D071200 – Машиностроение (6D071206 – Машины, агрегаты и процессы (6D071206-01 – технические науки) по пунктам:**

3.2.1. Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов;

3.2.3. Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций;

3.2.5. Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса;

3.2.6. Исследование технологических процессов, динамики машин, агрегатов, узлов и их взаимодействия с окружающей средой.

**Личный вклад автора** заключается в проектирование, изготовление, испытание станка новой конструкции для центробежной абразивной обработки изделий из самоцветных камней, проведение экспериментальных исследований и обработки результатов экспериментов, участие в написание статей, а также разработке технологического процесса обработки шариков из различных камне самоцветных материалов.

**Апробация результатов исследования.** Результаты докторской диссертации прошли апробацию на ряде международных и республиканских научных конференций. Основные положения работы были представлены в виде докладов и обсуждены с научным сообществом, а также опубликованы в рецензируемых изданиях.

- **Международные конференции, на которых осуществлялась апробация:** научно-практическая конференция «Энергетика региона: состояние и перспективы развития», ТТУ имени академика М.С. Осими, Душанбе, 20-21 декабря 2019г.; I международная молодёжная научная конференция «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование», (Россия, Москва, 21-24 апреля 2020г.); научно-практическая конференция «Инновационно - инвестиционные модели ускоренного развития промышленности Республики Таджикистан в современных условиях», Технологический университет Таджикистана, Душанбе, 15-16 октября 2021г.; XV научно-техническая конференция «Приборостроение-2022», Белорусский национальный технический университет, Минск, 16–18 ноября 2022г.; научно - практическая конференция «Современные проблемы точных наук в подготовке

высококвалифицированных кадров для горно-металлургической отрасли страны», Горно-металлургический институт Таджикистана, Бустон, 11 марта 2023.; научно-практическая конференция «Наука – основа инновационного развития», Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе, 18-19 апреля 2024г.; научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера xxi века», Донецкий национальный технический университет, Донецк, 16 – 22 сентября 2024г.; научно-практическая конференция «Современные задачи машиностроительной промышленности», ТТУ им. Акад. М.С. Осими, Душанбе, 31 октября 2024г.; XVII научно-техническая конференция «Приборостроение», Белорусский национальный технический университет, Минск, 26–29 ноября 2024 г.

• **Республиканская конференция:** научно-практическая конференция «Конкурентные преимущества национальной экономики на пути к новой модели экономического роста», Технологический университет Таджикистана, Душанбе, 24-25 апреля 2020 г.

**Материалы диссертации применяются** в учебном процессе для машиностроительных специальностей ТТУ имени академика М.С. Осими. Результаты работы используется в практической деятельности ООО «РУХОМ», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

**Опубликованные результаты исследования.** По итогам проведенного исследования и полученных результатов по теме диссертационной работы опубликовано 24 научные работы, включая 6 статей в ведущих рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК при Президенте Республики Таджикистан. Также получены 2 малых патента на изобретения, а результаты представлены в материалах различных научных конференций и других специализированных изданиях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объём работы составляет 168 страниц, выполненных на компьютере. В тексте представлены 6 таблиц, 45 иллюстраций, 5 приложений и библиография, включающая 158 наименований.

# **Глава 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ**

## **ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1. Способы центробежной абразивной обработки, их анализ**

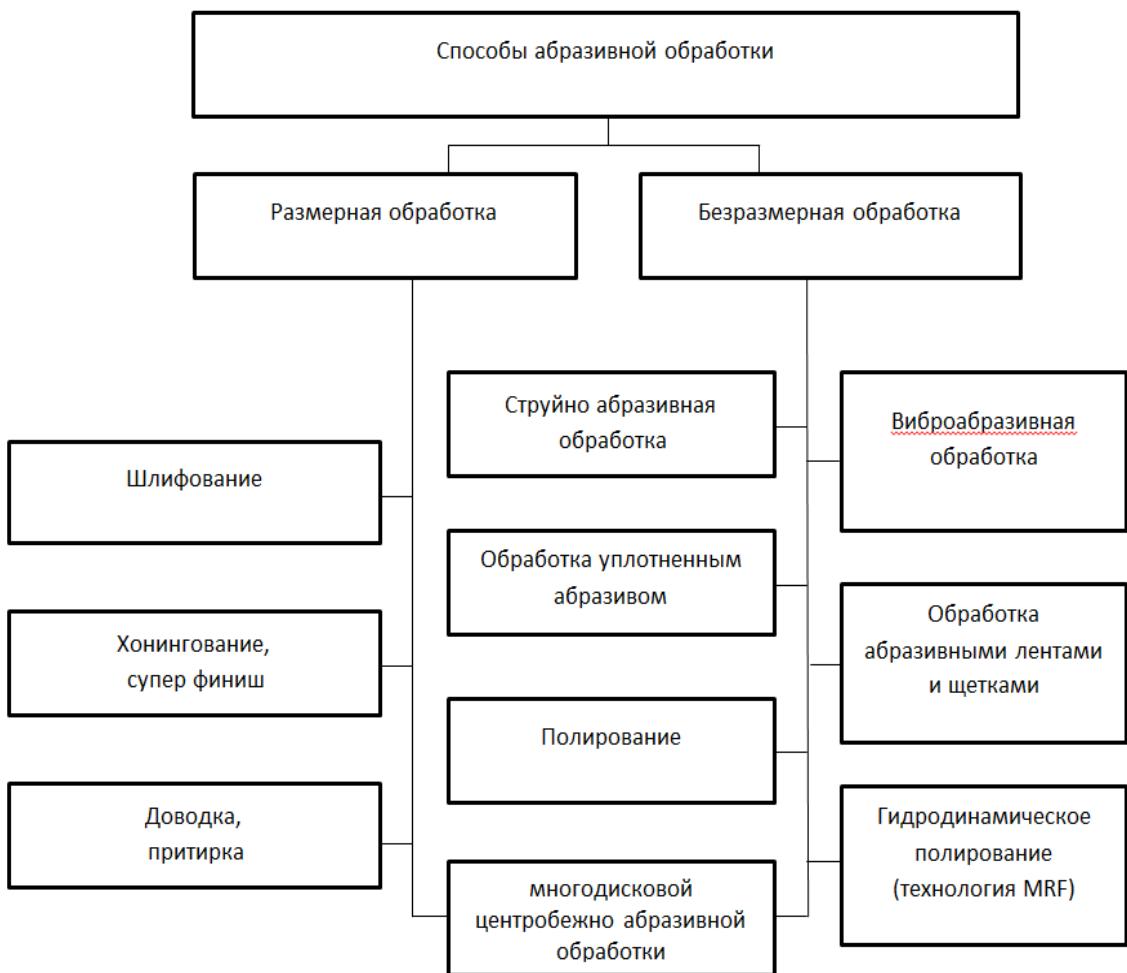
Абразивная обработка является завершающей операции, который формирует требуемые показатели качества поверхности и точности размеров. Абразивная обработка осуществляется использованием специальных инструментов и оборудования. Составная часть инструментов являются абразивные зерна или сверхтвёрдые кристаллы. При абразивной обработке заготовкам придают соответствующие размеры, точности формы и качество поверхности. К абразивной обработке относятся шлифование, доводка, полирование, хонингование, доводка. При абразивной обработке снятие стружки производится абразивными зернами. Единичное зерно снимает мельчайшей стружки. Количество одновременно работающих зерен много. Поэтому процессы абразивной обработки, довольно производительны. Эти процессы наиболее востребованы в производстве точных деталей, к которым предъявляются высокие требования к минимальной шероховатости поверхности.

Методы абразивной обработки широко применяются при выполнении таких операций, как шлифование, хонингование, доводка и полирование. Операции шлифование и хонингование в основном выполняют с использованием инструментов с связанным абразивом. При доводке и полировании используют свободный абразив. Связанный абразив держится связкой и инструмент в целом состоит из связки и абразива, например шлифовальный круг. Свободный абразив наносится на поверхности инструмента или обрабатываемой детали в виде абразивной пасты или подается в виде суспензии. Доводкой можно снимать тончайшие слой, измеряемые в нескольких микронах, с обрабатываемой поверхности. Этот метод чаще всего используется при обработке прецизионных деталей. Операция полирование позволяет улучшить показатели качества поверхности без изменения размеров

детали. Абразивную обработку можно использовать как финишную операцию размерной и безразмерной обработки поверхностей.

## 1.2. Анализ способов абразивной обработки

Существуют множество способов абразивной обработки. Исходя из способа обработки и оборудование, используемое для его осуществления проведено классификации способов абразивной обработки (рисунок 1.1).



**Рис.1.1. Классификация способов абразивной обработки**

### 1.2.1. Способы абразивной обработки

Широко применяются способы абразивной обработки такие как: шлифование, доводка, хонингование, суперфиниширование, полирование, галтовка и тд.

Рассмотрим особенности этих методов обработки и области их использования.

1. Шлифование. Методы шлифования поверхностей можно разделить на круглое шлифование и плоское шлифование. Круглое шлифование применяется при обработке поверхностей тел вращения, таких как наружные и внутренние поверхности цилиндрической, конической формы. Плоское шлифование используется для обработки плоских поверхностей. Бесцентровое шлифование применяется при обработке наружных поверхностей деталей тел вращения, например, коротких валов, колец подшипников, роликов и других аналогичных изделий [12].

2. Резание абразивными инструментами. Резание абразивными инструментами в основном применяется в заготовительных операциях. Обработка производится алмазными или абразивными кругами, также штрапсовыми пилами.

3. Притирка и доводка. Области их применения, это обработка высокоточных деталей. Отклонения размера и формы при этом составляют от нескольких мкм до доли мкм. Например, детали плунжерной пары дизельных двигателей имеют отклонения от округлости не более чем 0,1 мкм, конусность на длину 50мм не превышающий 0,6мкм. Обработка при этом производится притиром. Притир – это специальный инструмент с нанесенными на его рабочую поверхность мелкозернистой абразивной пастой.

4. Хонингование. Операция хонингование в основном применяется при обработке отверстий. Применяемый инструмент называют хоном. Хон состоит из стержня с закрепленными на нем абразивными брусками. Количество брусков составляет от от 3 до 5 штук.

5. Полирование. Основное назначение операции полирования, это придание поверхности изделий, особенно ювелирной, товарный вид. При полировании инструментом служат мягкие круги из сукна или фетра с нанесенной на них абразивной пастой. Известен, также способ полировки в вибробарабанах, в которые заливается жидкость с мелким абразивным порошком, засыпают деталей, а барабану сообщается вращательное или вибрирующее движение.

6. Гидроабразивная обработка. Применяется при формообразование деталей. Сущность процесса заключается в том, что с под высоким давлением подается струя воды с абразивом. Обработка поверхности этим способом желательно в случаях, когда не допускается нагрев обрабатываемого материала.

7. Ультразвуковая обработка. Данный способ обработки применяется при обработке особо твердых материалов, камнях, керамики, а также образование определенного рисунка на поверхности изделия.

8. Магнитно-абразивная обработка. В данном процессе используются специальные абразивные частицы из ферромагнитного материала. Обработка производится за счет управляемого движения абразивных частиц и заготовки относительно друг друга под действием магнитного поля. Этим способом обрабатываются детали различных форм с цилиндрическими, винтовыми, а также криволинейной поверхностями.

9. Суперфиниширование. Данным способом придают деталям с сложными профилями высокой чистоты и гладкости. Суперфиниширование, как и полирование, относится к методом безразмерной обработки и используется для достижения требуемой шероховатости поверхности [19].

«Методы абразивной обработки в различных областях исследованы учеными П.И. Ящерицын, Л.А. Олендер, М.Ю. Пикус, В.П. Луговой, И.И. Дьяков, К.Г. Щетникович, И.П. Филонов, Ю.А. Добрынин, А.С. Козерук, А.П. Бабичев, Ю.В. Димов, А.Н. Мартынов, М.А. Тамаркин, З.И. Кремень, В.М. Сорокин, Г.В. Литовка, А.П. Сергиев, М.Е. Шайнский, Ф.Ю. Сакулевич, Н.Я. Скворчевский, К. Матцунага, В. Брандт, В.О. Трилисский, Ю.М. Барон, В.М. Шумячев, И. Раш и др» [10].

Методы абразивной обработки можно разделить на методы, обеспечивающие точность размера и методы безразмерной обработки. Рассмотрим данные методы в отдельности.

### **1.3. Размерная абразивная обработка**

Методы шлифования. Из классификации методов абразивной обработке следует, что к размерной абразивной обработке относятся методы шлифования,

хонингования, суперфиниш, доводка, притирка. Особостью этих методов заключается в том, что при их осуществление используются абразивные инструменты со связанным абразивом. В машиностроение большинство детали имеют поверхности с заданным размером и точностью формы. Эти детали входят в контакт, с другими деталями конструкции образуя пару трения. Например, детали плунжерной пары дизельных двигателей относятся к высокоточным деталям изготавляемых массово, миллионами единиц. Отклонение от округлости плунжера допускается в пределах 0,1 мкм, конусность на длине 50 мм не более 0,6 мкм [19].

Существуют различные способы финишной обработки. Области их применения определяются технологическими возможностями. Наибольшее распространение получили методы шлифования. Шлифованием обеспечивается высокую точность формы и размера обрабатываемых поверхностей [1].

Главным движением при шлифование является вращение круга. Его скорость при обработке достигает 40...90 м/с. Например, при черновом шлифовании линейная скорость вращения круга может составлять до 60м/сек, а линейная скорость заготовки при этом составлять не более 130... 150 м/мин, при глубиной резания - до 6 мм» [2]. Шероховатость поверхности при шлифование зависит от множество факторов. Особенно сильно влияют на параметры шероховатости образованной шлифованием режимы резания. За счет подбора режимов резания при шлифование можно обеспечить шероховатость поверхности  $Ra=0,08...1,25$  мкм. При шлифовании поверхности за счет резания зернами абразива и упругопластические деформации обрабатываемой поверхности происходить интенсивное тепловыделение.

Мгновенная температура в зоне резания при шлифовании может достигать  $1000^{\circ}\text{C}$  и выше, средняя температура  $20\text{..}350^{\circ}\text{C}$  [3]. Под действием высоких температур в зоне контакта металла-абразив происходит структурное изменение приводящие к появлению остаточных напряжений и изменение механических и физических свойств поверхностного слоя [1]. Остаточные напряжения бывают растягивающими или сжимающими. Растягивающие

остаточные напряжения возникают при быстром нагреве и охлаждение обрабатываемой поверхности, что имеет место при шлифование. Величины остаточных напряжений при шлифование зависят от режимов обработки и находятся в пределах 250..350 МН/м<sup>2</sup>. На обрабатываемой поверхности, также могут возникать дефекты в виде наплывов, задиров, прожогов, микротрешин которых можно обнаружить при визуальном осмотре.

Дефекты снижают эксплуатационные показатели деталей и служат как очагами разрушения детали. Поверхности, обработанные шлифованием, имеют пониженное сопротивление механическому разрушению. За счет подбора режимов резания (скорость резания, подача и глубина резания) в какой-то мере можно улучшить показателей качества деталей, однако обработка при таких режимах значительно снижает производительность процесса шлифования [1].

**Хонингование.** Области применения хонингование это финишной обработки высокоточных поверхностей тел вращения. Область применения хонингование — это финишная обработка подвижных соединений, таких как гильзы цилиндров ДВС, кольца подшипников, детали пневмо и гидроаппаратуры и тд. В зависимости от технические требования к деталям, например получения поверхностей деталей высокой точности или получения выглаженного микрорельефа, обладающий более высокое сопротивление износу применяют различные режимы хонингования [4].

При интенсивных режимах обработки хонингованием контактная температура достигает 280. .550°C [2], что идентично шлифованию. После хонингование в режиме трения-полирования меняется качественное строение обработанной поверхности. На поверхностный слой вследствие выхода дислокаций на поверхность образуются" ямок травления". Поверхностный слой металла при этом становится мелкодисперсным на поверхность [5]. При обработке детали хонингованием в режиме трения-полирования на приповерхностном слое образуются остаточные напряжения величиной до 70...90 кгс/мм<sup>2</sup>, что способствует сопротивление износу и коррозии [4].

**Доводка.** Существуют методы доводки, выполняемые связанным абразивом и методы, осуществляемые свободным абразивом. Применение того

или другого способа зависит от его целесообразности при конкретных условиях. Независимо от метода осуществления физическая сущность процессов, происходящие в поверхностном слое одинаковы. Это микрорезания абразивными зернами и одновременное пластическое деформирование поверхности [6].

Когда твердость абразива в 1,5 раза и более по отношению к твердости обрабатываемой заготовки абразивные зерна при определенных режимах режут тончающие стружки, производя доводку поверхности. При доводке шероховатость обработанной заготовки составляет  $Ra = 0,08...0,32$  мкм.

Когда доводка осуществляется абразивными зернами при малых давлениях в этом случае преобладает пластическое деформирования неровностей над резанием. При таком способе обработки шероховатость обработанных поверхностей равняется  $Ra = 0,01...0,06$  мкм, что аналогично полированной поверхности.

Когда требования к качеству обрабатываемой поверхности высокие операцию доводки выполняют в два этапа. На первом этапе снимают максимальный припуск. На втором снимают минимальный припуск и формируют требуемое качество поверхности за счет пластического деформирования неровностей поверхностного слоя. В случае, когда доводку производят свободным абразивом переход от режима микрорезания к пластическому деформированию выполняется путем снижение скоростей и замены абразивов на более мелкозернистые [6]. Трудоемкость обработки в режиме полирования выше и соответственно себестоимость обработки увеличивается.

#### **1.4. Безразмерная абразивная обработка**

К способам безразмерной обработки деталей относятся: вибрабрзивная обработка, обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива, струйно-абразивная обработка, полирования абразивными лентами, многодисковой центробежно абразивной обработки. Рассмотрим эти методы и области их применения.

**Вибраабразивная обработка.** При данном виде обработки воздействия на поверхность деталей осуществляют абразивные частицы совершающие вибрации при большой частоте и малой амплитуды. При вибрации абразивные частицы, используемые для нанесения микроударов врезаются в поверхность детали осуществляют микрорезание или пластическую деформацию поверхности. В качестве таких частиц используют стальные шары диаметром 4 ...8 мм, или абразивную крошку [7].

Ударное воздействие частиц приводить к образования наклена и тем самым повышению микротвердости на 46 - 56%. После шлифования на обрабатываемой поверхности образуются растягивающие напряжения, что снижает сопротивляемость износу и коррозии.

В результате вибраабразивной обработки на глубиной залегания примерно 20мкм растягивающие напряжения сменились на сжимающие напряжения, что способствовало улучшению механических характеристик деталей. Область применения вибраабразивной обработки, это операции по удаление дефектов поверхностного слоя на деталях из различных материалов. Его можно применять для обработки деталей массой до трех килограмм.

Применением вибраабразивной обработки можно улучшить физико-механические характеристики поверхностей, снижать шероховатости, округлять острые грани, полировать поверхности. Применением данного метода можно обеспечить шероховатость обрабатываемых поверхностей изделия  $Ra$  в пределах 0,15...0,30 мкм [7].

### **Обработка уплотненным потоком свободного абразива**

Сущность данного процесса заключается в том, что под действием центробежных сил из абразивной массы создается уплотненный поток. При контакте и относительном перемещении относительно обрабатываемой поверхности абразивные частицы ударяются и снимают тончайший слой с поверхности изделия. За счет удараения абразивных частиц микротвердость поверхности значительно возрастает, на глубина до 70 мкм образуется наклепанный слой. Растягивающие напряжения заменяются на сжимающие величиной 40...50 кгс/мм, что улучшает сопротивляемость поверхности износу.

Данный способ применяется для отделочной обработки широкого круга деталей типа тел вращения [8].

### **Струйно-абразивная обработка**

Струйно-абразивная обработка производится потоком абразивных частиц, которым сообщается большая линейная скорость воздействием струей газа. При этом частиц абразива увлекается потоком воздуха под давлением, и приобретают большую кинетическую энергию. Абразивные частицы с большой кинетической энергией соударяясь с обрабатываемой поверхности производят упругое и пластическое деформирование и микроразрушение поверхностного слоя. Струйно-абразивная обработка в основном используется на операциях зачистки поверхностей детали. При обработке данным способом можно обеспечить шероховатость поверхности в пределах  $Ra = 0,32...0,63$  мкм [9].

### **Полирование абразивными лентами.**

В обрабатывающей промышленности различных отраслей промышленности нашли применение обработка абразивными лентами. При этом используя ленты различной зернистости можно образовать поверхности с различными показателями качества поверхности. Например, при обработке шатунных шеек коленчатого вала мелкозернистой ленты получены показатели качества поверхности до значения  $Ra = 0,04...0,08$  мкм.

За счет подбора оптимальных режимов обработки можно осуществлять шлифование или полирование поверхности с обеспечением требуемых параметров качества поверхности при наибольшей производительности процесса обработки. Работа при повышенных скоростях при ленточном полировании снижает шероховатость поверхности, но при этом есть вероятность рост значений растягивающих напряжений, что не желательно с точки зрения эксплуатации [10].

## **1.5. Способы центробежно - абразивной обработки и её виды**

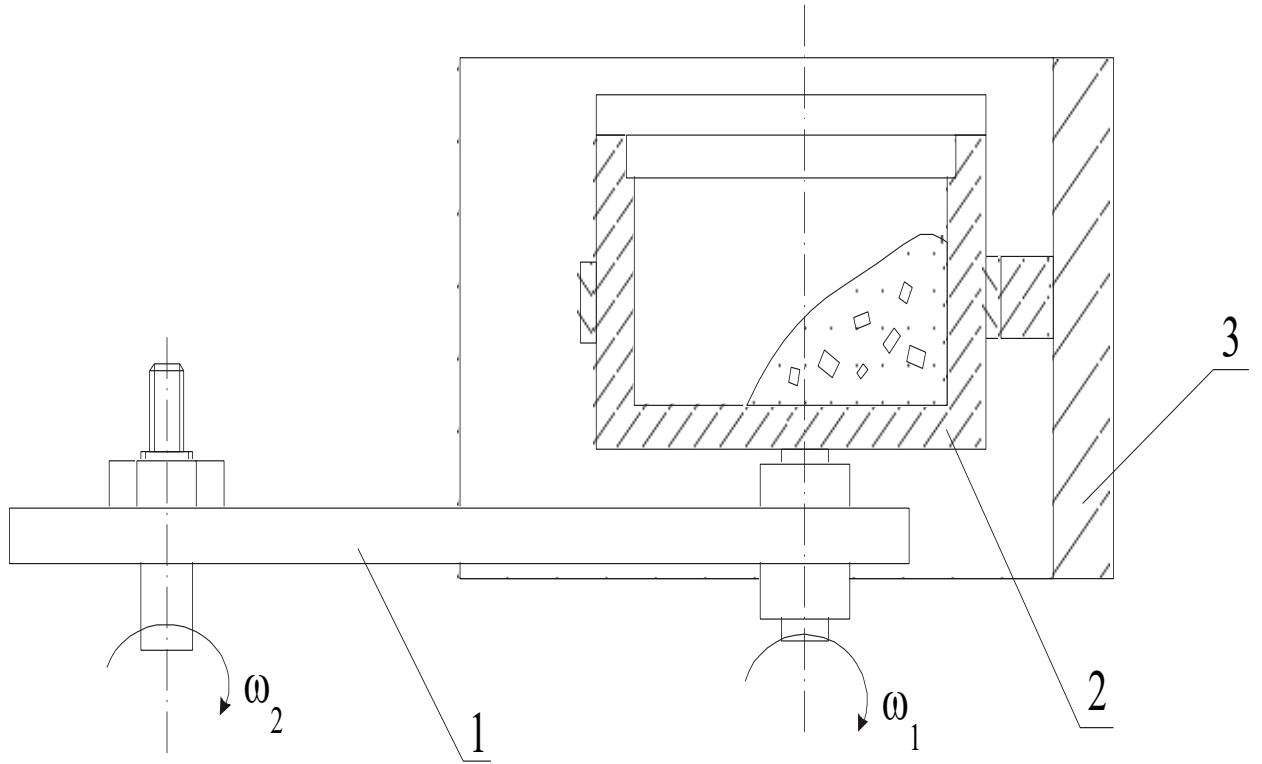
Имеются различные способы центробежно-абразивной обработки, также устройства для их осуществления [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]. Основу этих методов составляют обработка во

вращающихся барабанах. Барабаны чаще всего имеют коническое дно и цилиндрическую часть. При обработке на заготовок действуют центробежные силы под действием которых заготовки поднимаются вверх по конической части, доходя до цилиндрической части, падают вниз. Загрузочная масса в целом осуществляет тороидальное движение.

Существуют устройства ось вращения барабана которой совпадает с ее осью симметрии, а также устройства ось симметрии, которой смещен от оси вращения. В случае несовпадение осей вращения и симметрии барабана возникают дополнительныеibriующие движения, что ускоряет процесс обработки.

В других устройствах вращающимся является только дно барабана. При этом заготовки, загруженные в барабан, под действием центробежных сил инерции перемещаются к его периферии – к станкам. При соприкосновении со стенкой заготовки поднимаются по ней на определённую высоту, где под действием приложенных сил их движение замедляется, после чего они падают обратно вниз. Интенсивность обработки при использовании этих устройств выше, чем в устройствах, где барабан с коническим дном и цилиндрической части в целом [13].

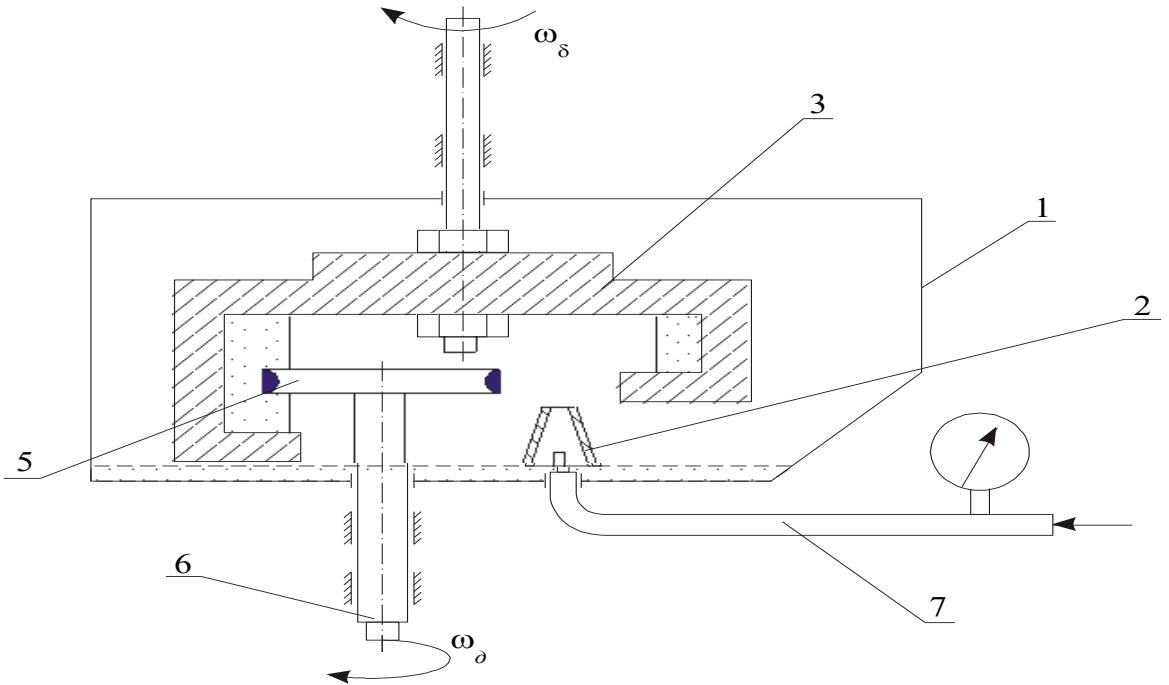
На рисунке 1.2 показано схема планетарно-центробежной обработки. Обработка производится в барабанах 2, которым сообщается планетарное движение. На вращающееся платформу 1 смонтированы головки с рабочими барабанами 2, головки не имеют привода и свободно установлены в подшипниках. Платформу 1 сообщается вращательное движение от отдельного привода [12]. При работе станка головки с барабанами 2 обкатываются по неподвижной обечайке, установленной во внутренней части неподвижного корпуса 3 [12].



**Рис. 1.2. Схема обработки на планетарно-центробежном устройстве**

Схема обработки уплотненным потоком абразивных частиц приведено на рисунке 1.3. Принцип работы данного устройства основано на создание уплотненного потока абразивных частиц. Уплотнений поток абразивных частиц создается центробежной силой прижимающий их в полости инструмента 3.

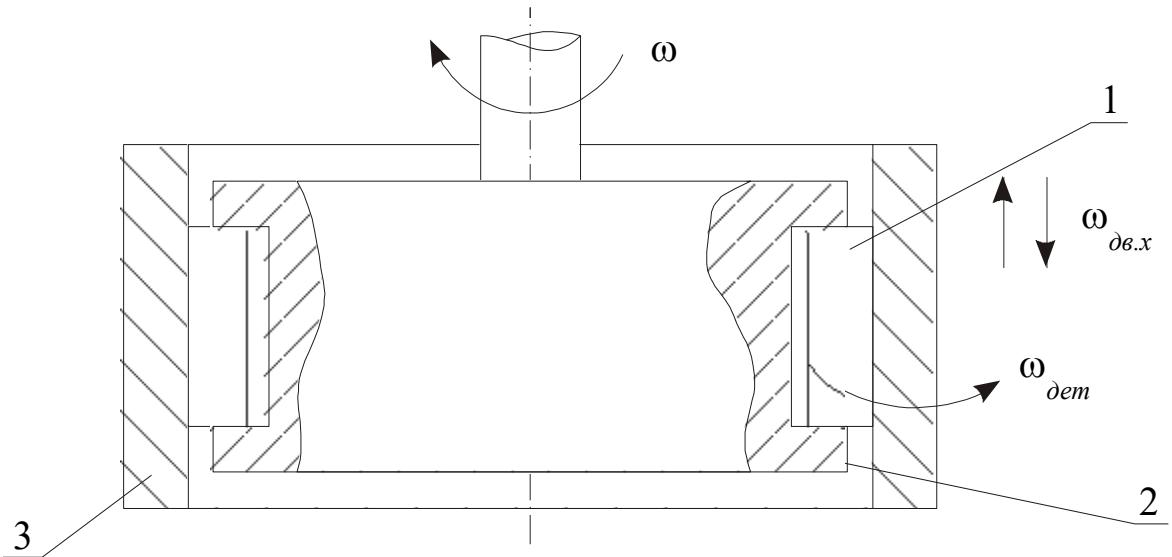
Уплотнений поток создается в чащу 3, установленную на врачающем шпинделе 4. Для этого абразивная эмульсия путем инжекции посредством насадки передается в вращающейся чащу 3. Обрабатываемая деталь 5 установлено в шпинделе 6 и контактирует с потоком уплотненного абразива. При обработке вращение чащи и детали встречное. При данном способе обработки точность размера не обеспечивается. Основной область применения его отчистка деталей и сглаживание поверхности.



**Рис.1.3. Схема устройства для обработки уплотненным потоком абразивных частиц**

На рис. 1.4. представлена схема центробежной абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей. Особенностью данного способа является возможность корректировки формы и размеров обрабатываемых деталей. Обработка осуществляется следующим образом: детали цилиндрической формы (1) устанавливаются в ячейках сепаратора (2) [19], размещённого в полости барабана (3), содержащего инструмент в виде вставного абразивного вкладыша. Сепаратор с установленными деталями приводится во вращение. Под действием центробежных сил детали, находящиеся в ячейках, прижимаются к поверхности инструмента. Сила прижима зависит от частоты вращения сепаратора и может регулироваться плавно и бесступенчато путём изменения этой частоты [13]. При обработке можно использовать инструмент с жестко закрепленным абразивом или использовать свободный абразив, путем его нанесения на поверхности инструмента перед обработкой. Съем материала при этом осуществляется абразивными частицами за счет относительного скольжения деталь-абразив. Инструмент также совершает возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости, что обеспечивает равномерности его изнашивания.

Область применения данного метода, это обработка деталей тел вращения из различных материалов, в том числе из цветных камней.



**Рис. 1.4. Схема центробежной абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей**

В данной работе исследуется возможность применения способов центробежной абразивной обработки для формообразование заготовок из цветных камней. Обрабатываемость камней зависит от их химико-физических свойств. Исходя из этого приводим некоторые сведения о самоцветных камнях.

## **1.6. Самоцветные камни и их свойства**

### **Твердость самоцветных камней.**

Самоцветные камни отличаются по химико-физическими показателям. Один из важнейших показателей влияющий на их обрабатываемость, это твердость камня. Под твердостью понимается способность камня сопротивляться физическому воздействию на его поверхность. Для оценки твердости самоцветных камней используется шкала Мооса. Твердость оценивается единицами от 1 до 10.

К сверхтвёрдым материалам относятся алмаз, эльбор, корунд, к твёрдым – кварц, шпинель, ортоклаз, к самому мягкому тальк [31-40]. Порядковый номер, или коэффициент согласно шкале Мооса определяется согласно таблицы

1. Каждый минерал приведённый в таблице царапает предыдущего и царапается последующим. Например, кальцит царапает гипс, а флюорит царапает кальцита.

В таблице 1 приведено твердость материалов по шкале Мооса.

Таблица 1.

№	Наименование	Твердость
1	Талк	1
2	Гипс	2
3	Кальцит	3
4	Флюорит	4
5	Апатит	5
6	Ортоклаз	6
7	Кварц	7
8	Топаз	8
9	Корунд	9
10	Алмаз	10

Как видно из таблицы алмаз по шкалу Мооса имеет твердость 10 и тем самым является самим твердым материалом. Твердость талка равно 1 и является самим мягким материалом.

При изготовление изделий используют различные камни, которые условно делят на драгоценные, полудрагоценные и поделочные [30].

### **Плотность и твердость самоцветных камней.**

Плотность камня можно определить как отношение массы к его объему. Значение твердости и плотности наиболее известных минералов приведены в таблице 2. Между плотностью и твёрдостью существует определенная зависимость. Исследователь А. Кенгот (1852) сравнивая плотность и твердость минералы, с сходными химическими составами установил, что более твёрдые в большинстве случаев являются также более плотными. Кенгот А. косвенно доказал зависимость твёрдости от межатомных расстояний в минерале, установив, что более твердые вещества обладают меньшим атомным объемом (более плотные).

Таблица 2

<b>№</b>	<b>Наименование</b>	<b>Плотность, г/см<sup>3</sup></b>	<b>Твердость (по Моосу)</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
1.	Авантурин	2,65	7
2.	Агат	2,6-2,65	6,5-7
3.	Аквамарин	2,67-2,71	7,5-8
4.	Александрит	3,7-3,72	8,5
5.	<b>Аметист</b>	<b>2,63-2,65</b>	<b>7</b>
6.	Апатит	3,17-3,23	5
7.	Берилл	2,65-2,75	7,5-8
8.	Бриллиант	3,47-3,55	10
9.	Гематит	4,95-5,16	5,5-6,5
10.	Демантоид	3,83-3,85	6,5-7
11.	Диопсид	3,27-3,31	5-6
12.	Жадеит	3,3-3,36	6,5-7
13.	Жемчуг	2,6-2,78	3-4
14.	Жемчуг черный	2,6-2,78	3-4
15.	Изумруд	2,67-2,78	7,5-8
16.	<b>Кварц</b>	<b>2,65</b>	<b>7</b>
17.	Коралл	2,6-2,7	3-4
18.	<b>Лазурит</b>	<b>2,4-2,9</b>	<b>5-6</b>
19.	Малахит	3,75-3,95	3,5-4
20.	Нефрит	2,9-3,02	6-6,5
21.	Обсидиан	2,3-2,6	5-5,5
22.	<b>Оникс</b>	<b>1,98-2,2</b>	<b>3</b>
23.	Родонит	3,4-3,7	5,5-6,5
24.	Рубин	3,97-4,05	9
25.	Сапфир	3,99-4	9
26.	Тигровый глаз	2,64-2,71	7
27.	Топаз	3,53-3,56	8
28.	Турмалин	3,02-3,26	7-7,5
29.	Халцедон	2,58-2,64	6,5-7
30.	Хризоберилл	3,7-3,72	8,5
31.	Хризолит	3,27-3,37	6,5-7,0
32.	Хризопраз	2,58-2,64	6,5-7,0
33.	Цитрин	2,65	7
34.	Шпинель	3,58-3,61	8
35.	Янтарь	1,50-1,69	2-2,5
36.	Яшма	2,58-2,91	6,0-7,0

Другой ученый А. Штрауф дополнительно установил, что для изоморфных веществ твёрдость, обратно пропорциональна удельному объему, а для полиморфных модификаций твёрдость прямо пропорциональна удельному весу минерала.

Впервые С. Боттоне (в 1873 г.) установил, аналитическую зависимость между твёрдостью и атомный вес, который представлено в следующем виде:

$$H = K d/A \quad (1.1)$$

Здесь  $K$  – коэффициент пропорциональности,  $d$  – плотность, а  $A$  – атомный вес.

Позже Лазарев П.П. (в 1918 г.) теоретически обосновал вывод Боттоне об изменении твёрдости пропорционально атомный вес элементов, уточнив, что оно имеет место только для аморфных материалов.

Э. Фридрих исследуя зависимости твердость вещества, валентность и атомный объем предложил следующую зависимость:

$$F = w/AV \quad (1.2),$$

В данной формуле  $w$  – валентность,  $A$  и  $V$  - атомный и молекулярный объем, выраженный через отношение удельного веса к атомному или молекулярному весу вещества. Проведя расчеты твердости множество минералов по этой формуле, Э. Фридрих установил области его применения. Уточнено, что данная формула дает большие погрешности в расчетах в случае её применения к сложным и комплексным соединениям.

Более точным способом определения твердости вещества экспериментальным путем. Существуют различные способы определения твёрдости. Твердость определяют методами Роквелла, Бринелля, Виккерса. По методу Роквелла непосредственно определяют глубину проникновения индентора, а методами Бринелля и Виккерса определяют площадь поверхности отпечатка. Если необходимо оценить твердость объекта меньшего масштаба, используют микротвердомер при помощи которой определяют микротвердость материала. Этим методом можно определить твердость тонких слоев материала, что невозможно при использовании методов Роквелла и Бринелля.

Для самоцветных камней твердость в основном оценивают методом царапания по шкалу Мооса.

## **1.7. Анализ технологий производства шариков из полудрагоценных и поделочных камней**

Рассмотрим существующие методы и устройства, применяемые при обработке самоцветных камней. Анализ патентных материалов показал, что существуют, множество способов обработки и конструкции устройства, которые по международной классификации именуются как М.кл. B24B11/02.

Существует конструкция устройства для центробежно – абразивной обработки деталей, оснащённого контейнером с вращающимся дном [11]. При его вращении загрузочная масса, находящаяся в контейнере, под действием центробежных сил перемещается по криволинейному профилю дна и поднимается вверх. Заготовки, взаимодействуя с неподвижной частью контейнера, оснащённой криволинейными пластинами, замедляют своё движение и затем падают обратно на дно. В результате интенсивного перемешивания заготовок с абразивной массой обеспечивается объёмная обработка поверхностей. Данное устройство может быть использовано для удаления заусенцев, а также притупления острых граней и углов заготовок.

В другом устройстве для центробежной абразивной обработки [31] предусмотрено абразивное кольцо, размещённое между частями дна. Каждая из частей дна оснащена индивидуальным приводом и вращается с различными угловыми скоростями. За счёт разницы этих скоростей увеличивается относительная скорость скольжения между заготовками и абразивным дном, что способствует интенсификации процесса обработки.

В патенте Планетарно – центробежная установка для абразивной обработки заготовок из различных материалов [35, 36], обработка производится в контейнерах, в которые загружена рабочая смесь. Контейнера вставляются в барабаны, которым сообщают планетарное движение. Для интенсификации процесса обработки дно контейнера выполнены в виде конической формы, а в цилиндрической его части вставлено втулка имеющий абразивное покрытие.

Кроме того, в данной конструкции ось симметрии контейнера и ось его вращения расположены эксцентрично [35, 36].

В добавок к этому планшайбу вместе с контейнерами сообщают угловые колебательные движения. Данная конструкция сложна в изготовление. Также дискретные колебательные движения не обеспечивают равномерного смещения рабочей смеси [13, 33, 34].

В соответствии с патентом «Способ шлифовки шариков, заготовки размещаются между вращающимся верхним диском с коническими отверстиями и неподвижной нижней планшайбой. Обработка осуществляется с обеих сторон одновременно. Во время процесса нижняя планшайба выполняет возвратно-поступательные движения относительно центра, что приводит к хаотичному вращению шариков внутри ячеек. Это обеспечивает увеличение пройденного ими пути и, как следствие, повышает эффективность процесса шлифовки [39].

«Известен способ центробежной абразивной обработки деталей, где обрабатываемые заготовки помещены с возможностью свободного вращения вокруг своих осей в отдельные гнезда сепаратора. Сепаратор концентрично вмонтирован в полости барабана, несущий на внутренней поверхности инструмент. При обработке сообщается вращательное движение вокруг своей оси с частотой достаточной для создания усилия прижима заготовок к поверхности инструмента. Барабану с инструментом сообщается возвратно-поступательное движение вдоль оси и вращательное движение вокруг оси» [40].

«В альтернативной конструкции для обработки шариков последние размещаются в доводочные узлы, выполненные в форме втулок. Втулки установлены между кольцами и соединены пружинами. Перед началом обработки шарики загружаются в доводочные узлы и устанавливаются в контакт с дорожками радиусного профиля на поверхности нижнего вращающегося доводочного диска. Посредством верхнего доводочного диска производится прижим шариков усилием 5-10 кгс, к нижнему диску. Обработка производится одновременно с двух сторон доводочными дисками. От

зернистости абразива подаваемой в зоне обработки зависит производительность и качество поверхности шариков» [13, 41, 42, 43, 44, 45].

«Известен также устройство для формообразования шариков, в котором заготовка размещается между двумя отрезками труб, расположенными под углом друг к другу. В зону обработки подаётся абразивная эмульсия или абразивная паста. Верхний трубчатый элемент удерживается и прижимается к заготовке вручную, в то время как нижняя вертикально установленная труба приводится во вращение от отдельного привода. Верхняя труба прижимается к поверхности шара и ему сообщается качательные движения по поверхности шара» [47].

«Существует также устройство для обработки шариков, где шарики размещаются между торцевой поверхностью вращающегося дискового инструмента и внутренними поверхностями инструментальных втулок. Инструментальные втулки установлены по концентричным окружностям относительно оси диска с возможностью вращения вокруг своих осей. Радиусы окружности кольцевых канавок поочередно отличаются друг от друга на 0,9-0,95d и на 0,6-0,7d, где d-диаметр обрабатываемых шариков» [13, 50].

«В другом устройстве для обработки шариков применяются рабочие диски с кольцевыми канавками сферической формы на периферии, покрытые абразивным слоем с крупной и мелкой фракцией. Между дисками установлен цилиндр с каналами, через которые подается под давлением жидкая или газообразная рабочая среда, содержащая пасту или другой абразив. Прижим шариков к рабочей поверхности кольцевых канавок дисков происходит под действием центробежных сил вследствие их пробега по этим канавкам под воздействием струи жидкости или воздуха» [51].

«Существенными недостатками данного способа являются: сложность изготовления дисков имеющие специальный профиль, необходимость в компрессоре для получения сжатого воздуха или насоса высокого давления для создание струи жидкости под давлением; невозможность получения сферические детали заданного размера вследствие невозможности гарантированного трехосного вращения; загрязнение от распылённой рабочей

среды, которое будет просачиваться через зазор между дисками большим давлением.

«Известно также устройство для обработки шариков, в котором их загрузка и выгрузка осуществляется с помощью лотков. на нижнем диске станке закреплены пластинчатые элементы с прямыми радиальными канавками. Кроме того, нижний диск оборудован спиральной канавкой, зазор между которой и радиальными канавками можно регулировать. Размер зазора зависит от диаметра шариков и угла их контакта, что позволяет оптимизировать процесс обработки и улучшить качество готовых изделий» [13, 52, 53, 54, 55].

«Анализ конструкции устройства и способов изготовления шариков из самоцветных камней показал, что применяемые способы обработки недостаточное производительны и не гарантируют требуемую точность формы и размеров. Во всех известных способах формообразования шариков одновременно задействовано несколько инструментов. В наиболее распространённом методе обработки шарики помещаются между двумя абразивными дисками в сепараторе и при вращении дисков обрабатываются по всей своей поверхности. Наиболее подходящее условие для формирования сферической поверхности этот обеспечение трехосное вращение вокруг осей координат – ОХ, ОУ и ОZ. Условия трехосного вращения при рассмотренных способах из-за особенностей кинематики процесса обработки обеспечить практически невозможно. Исследования показали, что при центробежной абразивной обработки создаются лучшие условия для трехосного вращения и соответственно для получения сферических поверхностей» [57].

## **1.8. Применение центробежных абразивных технологий в обработке полудрагоценных и поделочных камней**

«Для изготовления изделий из самоцветных камней чаще всего используют метод гальтовки в барабанах, вращающихся вокруг горизонтальной оси. Данный метод малопроизводительный и не обеспечивает стабильные показатели шероховатости поверхностей, обрабатываемых изделий. Смешивание деталей и абразивной массы при этом происходит под действием

силы тяжести. Линейная скорость вращение барабана также ограничено. Применение способов центробежной абразивной обработки многократно повышает производительность процесса галтовки» [1-А, 33, 34, 35, 36, 37, 45, 48, 50, 57]. «Однако при этом возможно увеличение брака в виде трещин на обрабатываемых поверхностях. Чтобы исключить ухудшение качества обработки и обеспечить наивысшую производительность обработки следует создавать новые процессы центробежной абразивной обработки исключающие ударные воздействия на заготовок при их обработке. При изготовление ювелирных изделий из самоцветных галтовка является основная операция обработки. Галтовкой выполняют множество операции, таких как- округление острых граней и углов, формообразование заготовок, например приданье заготовок из кубиков шаровидной форме, шлифование и полирование поверхностей. В каждом конкретном случае в зависимости от выполняемой операции необходимо использование соответствующих способов обработки, инструменты и соответствующие режимы обработки. Существуют множество методов и устройства для осуществления процесса центробежной абразивной обработки» [1-А-8-А, 61, 62, 63, 64, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74,75].

Основным фактором определяющие величину съема материала при галтовке является сила взаимодействия заготовки с абразивной массой. Центробежная гальтовка позволяет создавать условия, при которых центробежные силы инерции многократно превышают силу тяжести, благодаря чему съем материала значительно выше по сравнению с традиционной гальтовкой в барабанах с горизонтальной осью вращения [33, 34, 35, 36, 37, 45, 48, 50, 57]. Кроме того, в процессе центробежной абразивной обработки существует возможность регулирования силы резания. Это дает возможность расширять области применения данного метода обработки. Методы центробежной абразивной обработки и устройства для их осуществления рассмотрены в следующих работах [58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75]. Исходя из анализа существующих работ предложено новый метод обработки защищенное патентом нам изобретение

## **1.9. Сущность и особенности метода многодисковой центробежно - абразивной обработки шариков**

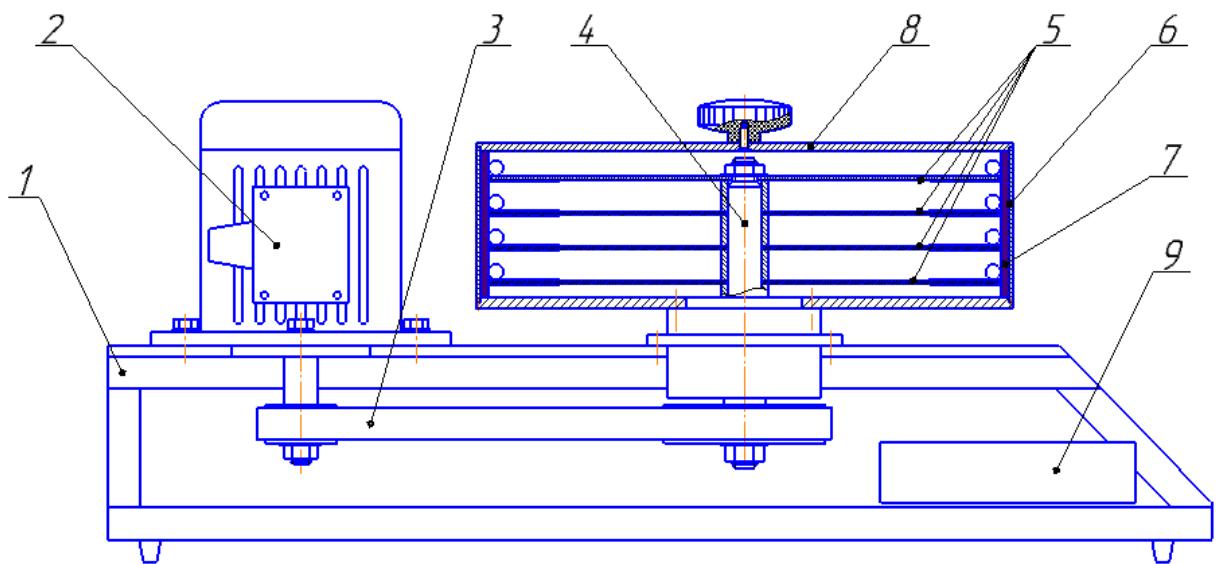
Сущность данное устройство заключается в том, используется принцип центробежной абразивной обработки, но в отличие от существующих методов производится обработка несколькими инструментами. Абразивные или алмазные диски, выполняющие роль инструмента, установлены внутри цилиндрического барабана вдоль оси, совпадающей с осью симметрии его цилиндрической части. Расстояние между дисками подбирается в соответствии с размерами обрабатываемых заготовок. Ось, на которой закреплены диски, вращается и приводится в движение отдельным электродвигателем. Абразивные диски могут иметь как одинаковую, так и различную зернистость. При использовании дисков с разной зернистостью они располагаются в порядке убывания зерна – от наиболее крупного в нижней части к самому мелкому в верхней.

«Предлагаемое устройство обеспечивает многократное повышение производительности при обработке заготовок типа шариков из самоцветных камней. Кроме того, оно позволяет одновременно выполнять формообразование, черновую и чистовую обработку» [8-А, 11].

### **1.9.1. Основные схемы и принцип работы**

«На рисунке 1.5 показан пример реализации многодисковой центробежно-абразивной обработки шариков. Основные компоненты устройства включают: корпус (1), электродвигатель (2), ременную передачу (3), шпиндель (4), абразивные диски (5), барабан (6), резиновое покрытие (7), крышку (8), электронное устройство для регулировки частоты вращения электродвигателя (9). Вращение шпинделя (4) передается от электродвигателя (2) установленный в корпусе (1), посредством ременной передачи (3). На шпинделе (4) установлены абразивные диски (5) выполняющие роль инструмента при обработке. Для предотвращения выпадение заготовок при обработке сверху барабана (6) установлено предохраняющая крышка (8)» [8-А].

«Подготовка устройства к работе осуществляется в следующем порядке: устанавливается нижний абразивный диск и заготовки размещают над нижним диском, далее сверху вставляется следующий диск и размещаются заготовки и тогда ли. Для первого диска в качестве исходных заготовок используются кубики из самоцветных камней. Исходные заготовки для загрузки первого являются кубики из самоцветных камней. В качестве заготовок для загрузки второго диска служат заготовки, обработанные в первом диске, а при загрузке третьего диска используются заготовки обработанные в втором диске, и так далее. После загрузки всех дисков сверху вставляется крышка (8). В время работы абразивные диски (5) приводятся во вращение шпинделем (4). Вращение шпинделю передается от электродвигателя (2) через реммennую передачу (3)» [8 -A].



**Рис.1.5. Устройство для многоинструментальной центробежной обработки шариков**

Скорость вращения шпинделя задается с помощью электронного регулятора (8). В ходе работы станки заготовки, под влиянием центробеной силы, перемещаются от центра к краю барабана. При соприкосновении с резиновым покрытием барабана их движение замедляется относительно самого барабана, но при этом увеличивается скорость скольжения между абразивным

диском и заготовкой. За счет интенсивного скольжения заготовок по инструменту и силового взаимодействия происходит съем материала с поверхности заготовки.

После завершения обработки заготовок, отключают станок, открывают крышку и выгружают обработанные заготовки с дисков. Предложенная способ обработки дает возможность существенно повысить производительность обработки. Установление зависимости производительности и точности обработки от технологических факторов требует проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

### **1.10. Заключение по литературному обзору**

По результатам анализа литературных данных установлено:

1. Оборудования используемое в настоящее время в ювелирной промышленности имеют низкую производительность. Большинство существующие технологии основаны на единичном и мелкосерийном производстве изделий, что оправдывает себе при обработке драгоценных камней. Доля изделий из драгоценных камней по сравнению с цветными невысока. Для повышения эффективности производства изделий из самоцветных камней необходимо снизить себестоимости изделий путем повышение производительность обработки;
2. Цветные камни имеют высокую твердость и одновременно хрупкие. Поэтому при их обработке следует устраниТЬ ударные нагрузки. Новые оборудование и технологические процессы должны отвечать этим требованиям;
3. Исследованы путей повышение производительности абразивной галтовки за счет усовершенствование конструкции и выбора подходящего способа обработки. Установлено, что наиболее производительными являются способы галтовки основанные на использование центробежных сил инерции. Производительность и качество обработки изделия применением методов центробежной абразивной обработки можно существенно повысить.

## **Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

### **2.1. Взаимодействия элементов загрузки при многодисковой центробежно абразивной обработки**

«Галтовка представляет собой один из ключевых методов формообразования для заготовок из полудрагоценных и поделочных камней. Суть данного процесса заключается в том, что в специальную емкость помещается смесь, состоящая из заготовок, абразивного материала и жидкости, которой придается сложное движение. В результате взаимодействия между заготовками, абразивом и жидкостью осуществляется обработка поверхностей изделий.

При этом округляются острые грани и заготовки получают округлые формы. Особенности применения галтовки для обработки полудрагоценных и поделочных камней такова, что не допускаются ударные нагрузки при обработке. Причиной этому является хрупкость камней. При ударных нагрузках, возможно, поломок или появление трещин, что снижает качество обработки. Поэтому изыскание методов галтовки обеспечивающий высокую производительность и требуемое качество поверхности является актуальной задачей.

В процессе обработки используются разные методы галтовки. Среди них можно выделить такие методы, как обработка в уплотненных потоках абразивных частиц, барабанная галтовка с горизонтальной осью, вибрационная обработка, многодисковая центробежная галтовка, использование направляющих пластин, а также планетарная центробежная галтовка» [2-А].

В процессе горизонтального вращения при галтовке перемещение и смещивание загружаемого материала происходит благодаря силе тяжести. Однако, поскольку эта сила сравнительно небольшая и скорость вращения барабана ограничена, данная методика характеризуется низкой производительностью.

Одним из значительных недостатков является отсутствие возможности одновременной обработки камней, обладающих различными характеристиками, особенно в отношении твердости. Основное достоинство данного метода заключается в том, что вероятность возникновения трещин и повреждений в процессе работы остается на минимальном уровне.

«В диссертации рассматривается новый метод галтовки, который обеспечивает высокую производительность и позволяет одновременно обрабатывать цветные камни с различными характеристиками. В предложенном способе обработка осуществляется под действием центробежных сил и в нескольких ячейках с применением специальных инструментов для обработки.

Исходя из этого данный способ именуется как, многоинструментальная центробежно абразивная обработка.

Производительность обработки значительно увеличивается при применении данного способа. Это объясняется тем, что:

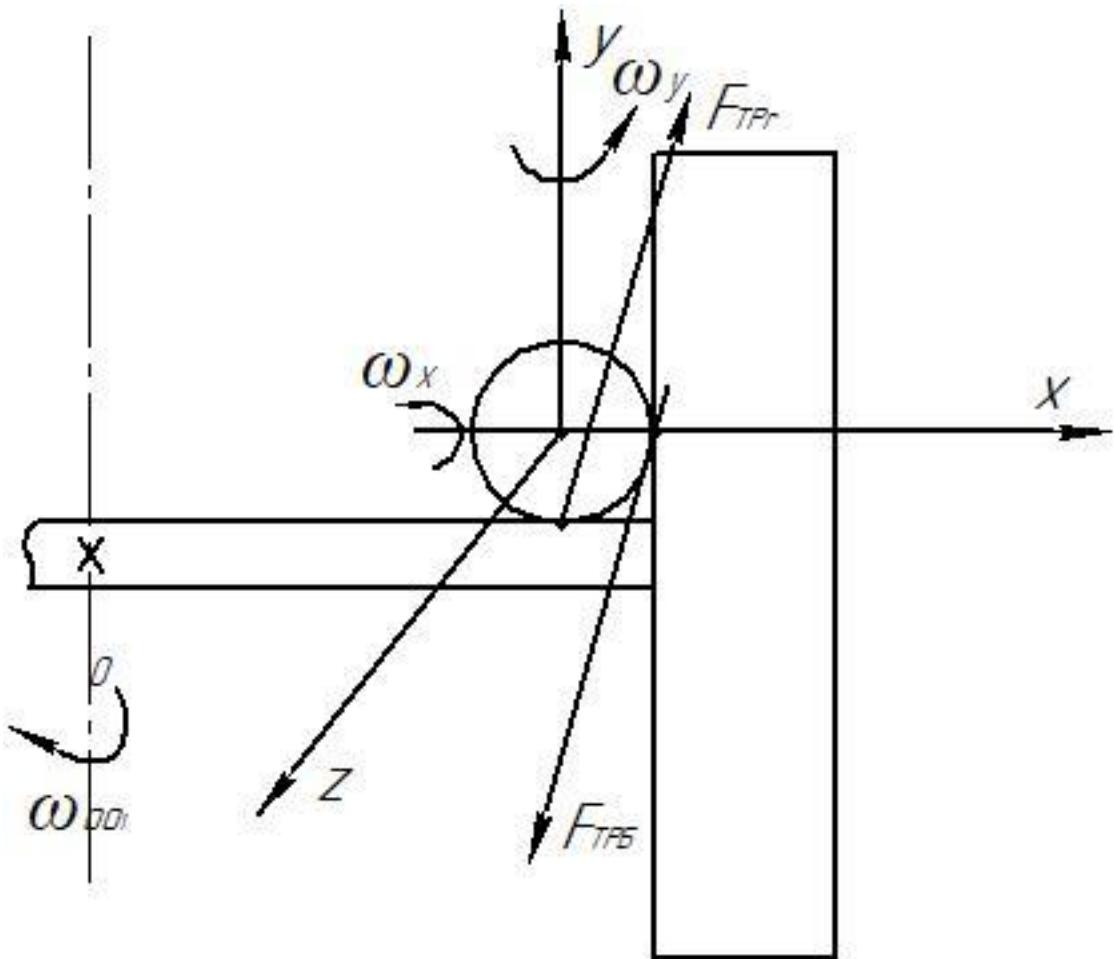
1. Процесс обработки осуществляется под воздействием центробежных сил, величину которых можно настраивать, изменяя скорость вращения инструментов.

2. Обработка одновременно производиться в нескольких ячейках отдельными инструментами. Можно многократно повысит производительность увеличением количества ячеек.

Изучение процесса обработки с применением многодискового центробежно-абразивного станка для обработки полудрагоценных и поделочных камней проводилось на специализированном станке, изображенном на рисунке 1.5. Этот станок оснащен пятью алмазными дисками, которые располагаются на одной оси» [2-А].

«Предложенная схема позволяет существенно повысить производительность и точность обработки деталей, типа шариков из самоцветных камней, повышает функциональную возможность, выражающихся в возможности одновременного выполнения формообразования, черновой и чистовой обработки. При необходимости, используя абразивные диски одинаковой зернистости, при помощи данного

устройства можно выполнять только одну операцию, но с большой производительностью.



**Рис.2.1. Силы действующие на заготовку при обработке**

«На рисунке 2.1 показаны воздействия, оказываемые на заготовку в ходе её переработки. Когда инструмент вращается, представляющий собой алмазный или абразивный круг, на заготовку влияют силы инерции, связанные с центробежной силой, а также силы трения.

Процесс вращения заготовки значительно влияет на качество обработки детали. Как только заготовка начинает взаимодействовать со стенками барабана, трение, возникающее между ними, играет важную роль в формировании её геометрии. В данной ситуации на деталь действуют центробежная инерционная сила -  $F_{\text{ц}}$ , трение со стенками барабана -  $F_{\text{тр}б}$  и трение с инструментом -  $F_{\text{три}}$ . Под влиянием этих сил заготовка начинает вращаться вокруг своих координатных осей.

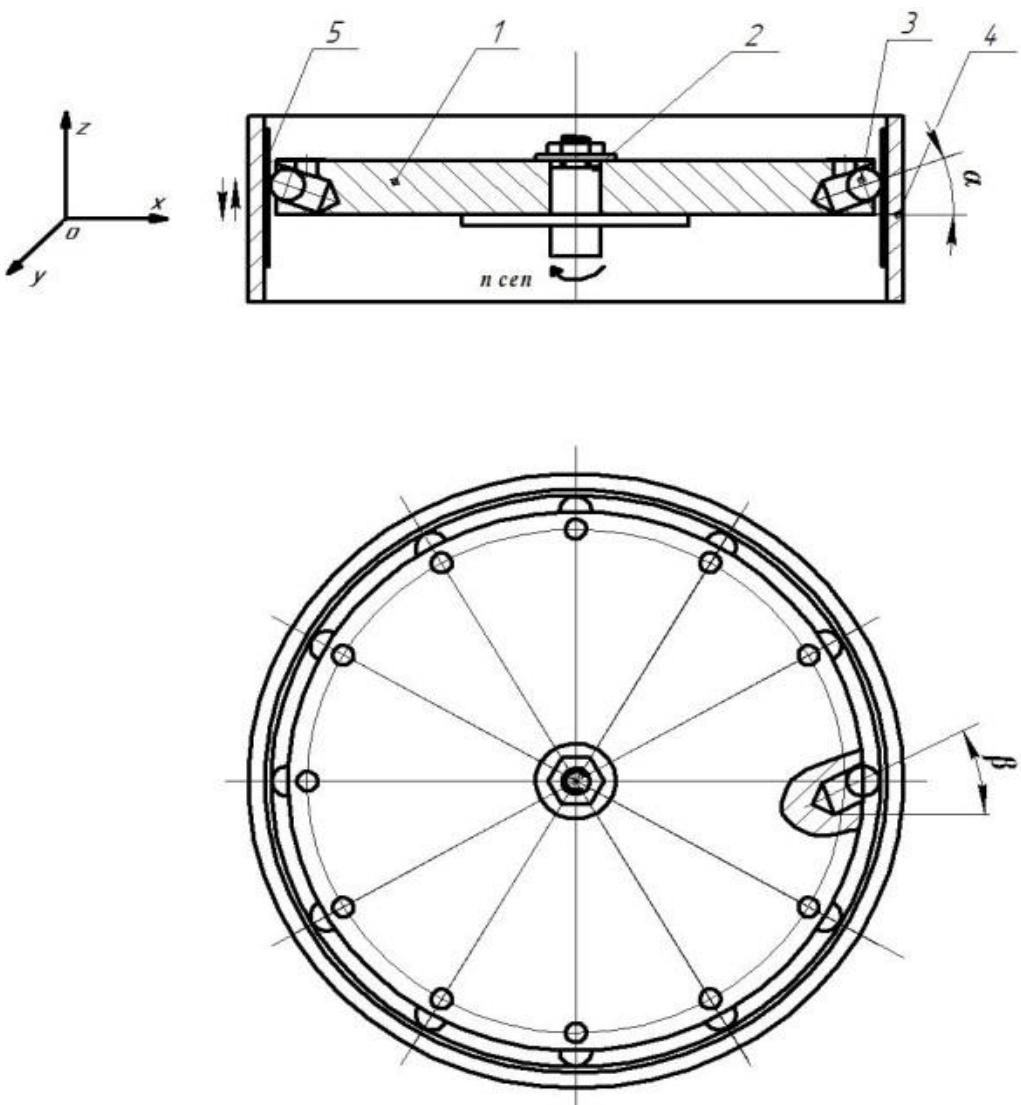
Вращение вдоль вертикальной оси ОУ устройства обеспечивается силой -  $F_{трб}$ , которая возникает из-за трения с барабаном. Вращение заготовки вокруг оси ОХ происходит под действием силы трения, приложенной к инструменту  $F_{три}$ . Одновременно перемещение вдоль радиального направления вызывает вращение вокруг оси ОZ. Такое трёхосное вращательное движение обеспечивает равномерную обработку всей поверхности заготовки, особенно в её выступающих зонах.

При обработке на данном станке в отдельных его дисках можно одновременно обработать камни с различными размерами в начале заготовки размещают внутри барабана над нижним диском, сверху вставляется очередной следующий диск, после чего помещаются новые заготовки и так далее.

В качестве заготовок для загрузки первого диска служат кубики из самоцветных камней, а в качестве заготовок второго диска заготовки, обработанные в первом диске, в качестве заготовок для загрузки третьего диска, заготовки обработанные во втором диске и т.д.

Когда номенклатура обрабатываемых изделий большая, данный способ обработки позволяет одновременно обработать несколько наименований изделий в отдельных ячейках.

Таким образом, предложенное устройство позволяет существенно повысить производительность и точность обработки деталей, типа шариков из самоцветных камней, повышает функциональную возможность, выражющуюся в возможности одновременного выполнения формообразования, черновой и чистовой обработки. При необходимости, используя абразивные диски одинаковой зернистости, при помощи данного устройства можно выполнять только одну операцию, но с большой производительностью.



**Рис.2.2. Схема центробежной обработки шариков в сепараторе**

На данном станке также можно осуществить шлифование и полирование шаровидных заготовок. Для этого вместо абразивного диска используют сепараторы 1 (рисунок 2.2). Сепаратор имеет отдельные гнезда, в которых устанавливаются обрабатываемые детали 3. Обработка при этом происходит под воздействием центробежной силы и относительного скольжения с поверхности инструмента. Инструмент в виде абразивной ленты установлено в внутреннее полости барабана. Данный способ предназначен для обработки изделий тел вращения небольших размеров, например шариков диаметром до 20 мм. Обработка производится в следующем порядке.

В качестве исходного материала выступают кубические заготовки с закруглёнными гранями (3), каждая из которых размещается в индивидуальной

ячейке вращающегося сепаратора. Вращательное движение передается сепаратору.

При запуске сепаратора, заготовки, находящиеся в своих ячейках, испытывают воздействие центробежной силы, которая прижимает их к абразивному инструменту (5). Чтобы избежать преждевременного износа инструмента в местах контакта с изделиями, барабаном и самим абразивом, предусмотрено выполнение возвратно-поступательных движений в вертикальной плоскости.

При этом важно обеспечить пересечение траекторий перемещения заготовок, заданных в смежных сепараторах. Каждый элемент имеет уникальную силу удерживания, которая определяется его весом. Размер центробежной силы, удерживающей заготовок возле инструмента, может быть рассчитан с помощью следующего уравнения:

$$F_{ц.c} = m_{заг} \times \omega^2 \times R_{сеп} \quad (2.1)$$

где: - Центробежная сила  $F_{ц.c.}$ , которая направлена радиально к оси вращения сепаратора. Она определяется массой изделия  $m_{заг}$  и расстоянием  $R_{сеп}$  от оси вращения до центра масс изделия.

Сила, с которой каждая заготовка прижимается, определяется её массой и остается неизменной независимо от числа заготовок, обрабатываемых одновременно. Эту силу можно изменять в широком диапазоне, варьируя скорость вращения сепаратора. Скорость вращения заготовок относительно их осей можно вычислить с использованием уравнения (2.2).

$$\omega_{заг} = \frac{(\omega_{ин} \pm \omega_{сеп}) \times R_{инс}}{R_{заг}}, \quad (2.2)$$

В данной формуле  $\omega_{ин}$  – обозначает скорость вращения инструмента;  $\omega_{сеп}$  – скорость вращения сепаратора;  $R_{инс}$  – радиус инструмента;  $R_{заг}$  – радиус заготовки» [2-А].

## **2.2. Влияние количества абразива на производительность обработки**

В процессе абразивной обработки, в зависимости от сил контакта, действующих со стороны абразива на обрабатываемую поверхность, могут происходить различные явления: упругое деформирование, пластическая деформация или микрорезание.

Когда преобладает упругий характер контакта обрабатываемой поверхности и абразива, величина съема незначительно, при этом за счет сглаживание неровностей обрабатываемой поверхности качество поверхности высокое.

Когда в процессе обработки преобладает пластическая деформация, на поверхности детали формируется особая микроструктура, состоящая из следов взаимодействия абразивных частиц. Эффективность такого вида обработки зависит от прочности абразивных зерен при динамических нагрузках, уровня удельного давления в зоне контакта, а также от размера используемых абразивных частиц.

«Согласно исследованиям П. Н. Орлова [81], увеличение количества свободного абразива при доводке деталей не приводит к повышению производительности процесса, а наоборот, вызывает её снижение. Это наблюдается даже при значительном росте количества абразивной пасты в зоне обработки почти в семь раз, с 30 мг до 200 мг. Кроме того, при увеличении количества абразива с 60 до 100 мг общее количество материала, удаляемого за 10 минут обработки, уменьшается в 20 раз по сравнению с исходным уровнем в 30 мг.

Наибольшая производительность достигается при условии 3 микрорезания. Неподвижные абразивные зерна могут резать поверхность только тогда, когда отношение глубины внедрения -  $h$  к радиусу  $R$  внедренных абразивных зерен достигает определенного значения. Микрорезание возникают, когда  $h/R$  составляет около 0,5» [65, 66].

Из-за того, что падение абразива создает упругий контакт между абразивными частицами и поверхностью изделия, можно определить нагрузку на одну абразивную частицу в зависимости от количества частиц, которые одновременно контактируют с поверхностью.

В связи с многофакторностью и сложностью процесса было проведено экспериментальное исследование барабанной галтовки для оценки воздействия количества абразива. Результаты изложены в разделе экспериментальное исследование.

### **2.3. Особенности формообразования шаровидных изделий на галтовочном барабане с канавками**

Исследования подтверждают эффективность использования галтовочных барабанов с канавками для обработки кубических заготовок с целью придания им идеально округлых граней. Наиболее эффективно этот метод можно использовать для заготовок ребром более 20 мм и более. При этом заготовки загружаются в соответствующие канавки барабана. В барабан также загружают абразив и рабочую жидкость.

В процессе обработки наиболее интенсивно стираются края и вершины кубической заготовки, в результате чего она приобретает сферическую форму.

Предыдущие исследования показали, что эффективность обработки определяется множеством факторов, среди которых можно выделить: скорость вращения барабана, объем загружаемого материала, количество абразивного вещества на один килограмм массы исходного продукта, а также соотношение между жидкой и твердой фазами во время обработки.

Эффективность процесса обработки в части производительность, точности и экономической целесообразности определяется значимостью этих параметров и их взаимной обусловленностью [1, 12, 15, 26, 55, 56, 65].

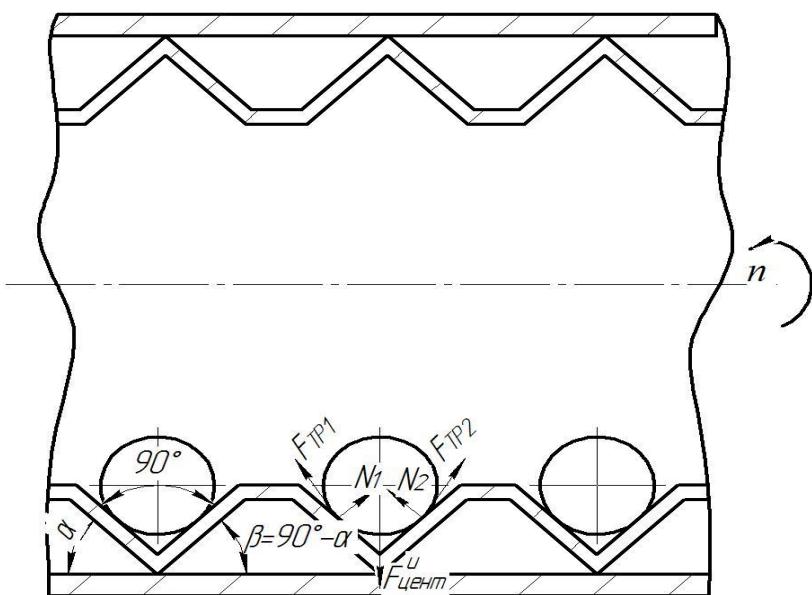
В ходе обработки заготовки, находящиеся внутри вращающегося барабана, перемещаются в направлении его вращения за счёт действия силы трения. Смесь, включающая заготовки, абразивные частицы и рабочую

жидкость, поднимается на определенную высоту, после чего скатывается или отделяется от стенки и падает вниз.

В результате относительного движения этих объектов и их взаимодействия с абразивным материалом осуществляется обработка заготовки. При взаимодействии сферических заготовок с поверхностью барабана основным типом сопротивления является трение качения. В случае с кубическими заготовками на начальной стадии обработки проявляются оба типа трения качения и скольжения.

При обработке кубических заготовок соприкосновение в основном происходит по вершине ребра куба, поэтому происходит исправление формы заготовок и приближение их к шаровидности.

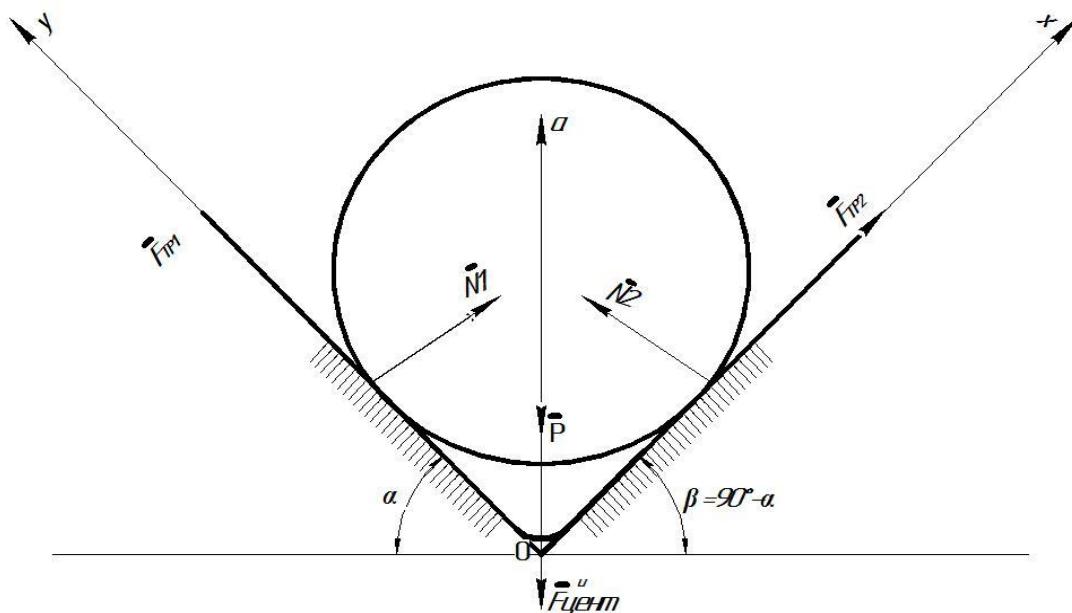
Сферические заготовки взаимодействуют с канавкой в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Геометрия контакта определяется углами  $\alpha$  и  $\beta$ , где  $\beta=90^\circ - \alpha$ ; эти плоскости формируют соответствующие поверхности цилиндра и канавки. На заготовку действуют следующие силы: сила тяжести  $\vec{P}$ , реакции опорных плоскостей  $\vec{N_1}$  и  $\vec{N_2}$ , силы трения в точках контакта  $\vec{F_{tp1}}$  и  $\vec{F_{tp2}}$ , а также моменты сопротивления, обусловленные трением качения  $M_1$  и  $M_2$ .



**Рис.2.3. Обработка круглых заготовок в галтовочном барабане с кольцевыми канавками.**

На рисунке 2.4. изображены силы, которые действуют на заготовку во время обработки. Рассмотрим действие этих сил более подробное.

Сила тяжести- $\bar{P}$  зависит от объема и удельного веса материала заготовки. За точкой приложения данной силы можно принять центр масс заготовки.  $\bar{N}$ -сила реакции в точках касания с плоскостями,  $\bar{F}_{tp}$ -сила трения,  $\bar{F}_{центр}^u$ -центробежная сила инерции от вращения заготовки вокруг оси барабана. Размещаем оси  $ox$  и  $oy$  по плоскостям канавки оу $\perp ox$ .



**Рис. 2.4. Схема обработка шаровидной заготовки в канавке галтовочного станка с горизонтальной осью вращения**

Составим дифференциальные уравнения движения шаровидного тела в канавке. Тело одновременно совершает вращательное и поступательное движения.

$$\left\{ \begin{array}{l} M\ddot{x}_c = \sum_{k=1}^n F_k^e \\ M\ddot{y}_c = \sum_{k=1}^n F_k^e \\ J_c \frac{d^2\theta}{dt^2} = \sum_{k=1}^n m_c (\bar{F}_k^e) \end{array} \right. \quad (2.3)$$

В этой системе уравнения (2.3) линейное движение объясняется первыми двумя формулами. Третье уравнение описывает вращение объекта относительно центра масс.

Систему уравнение (2.3) запишем в развернутом виде

$$\begin{cases} M\ddot{x}_c = P \sin \alpha + F_{\text{центр}}^u \cos \alpha - F_{\text{тр}} \\ M\ddot{y}_c = N - P \cos \alpha - F_{\text{центр}}^u \sin \alpha \\ J_c \varepsilon = F_{\text{тр}} R \end{cases} \quad (2.4)$$

В полученной системе уравнений  $P$  - сила тяжести,  $F_{\text{центр}}^u$ -центробежная сила,  $F_{\text{тр}}$ - сила трения заготовки с плоскостями прямоугольной канавки.

Момент инерции для используемой заготовки шаровидной формы можно записать как:  $J_c = \frac{MR^2}{2}$ , где  $R$  – радиус заготовки,  $M$ - масса заготовки.

Действующая центробежная сила инерции можно определить как:

$$F_{\text{центр}}^u = M\omega^2 \quad (2.5)$$

Сила трения заготовки в пятнах контакта с поверхностями можно определить как:

$$F_{\text{тр}} = fN \quad (2.6)$$

В уравнении 2.6.  $N$  представляет собой силу давления объекта на поверхность, которая приложено в точке их соприкосновения и направлена перпендикулярно к этой поверхности.

$$N = P \cos \alpha \quad (2.7)$$

В уравнении 2.7,  $\alpha$  - угол наклона плоскости по отношению к горизонтальной линии. При экспериментах его значение варьировалось в пределах  $5^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ .

Уравнения движения центра масс можно записать в так:

$$\begin{aligned} Ma_c &= P \sin \alpha - F_{\text{тр}} + F_{\text{центр}}^u \cos \alpha \\ Ma_c &= Mg \sin \alpha - fMg \cos \alpha + M\omega^2 R \sin \alpha \\ a_c &= g (\sin \alpha - f \cos \alpha) + \omega^2 R \sin \alpha \end{aligned} \quad (2.8)$$

Из уравнения вращательных движений объекта вокруг его центра масс (третье уравнение системы 2.4) вычислим угловое ускорение  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = \frac{F_{\text{тр}} \times R}{J_c} = \frac{2 \times f \times M g \cos \alpha \times R}{M \times R^2} = \frac{2 \times f g \cos \alpha}{R} \quad (2.9)$$

в начальном состоянии, когда  $\omega_0=0$

$$\omega = \omega_0 + \epsilon t = \frac{2fg \cos \alpha t}{R} \quad (2.10)$$

$$a_c = g (\sin \alpha - f \cos \alpha) + \frac{4f^2 g^2 \cos^2 \alpha R \sin \alpha t}{R^2}$$

$$a_c = g (\sin \alpha - f \cos \alpha) + \frac{2f^2 g^2 \sin 2\alpha \cos \alpha t}{R} \quad (2.11)$$

$$a_c = \frac{dV_c}{dt} \quad (2.12)$$

Подставляя  $a_c$  из (2.11) в равенство (2.12), получим:

$$\int_0^{V_c} dV_c = \int_0^t g(\sin \alpha - f \cos \alpha) dt + \int_0^t \frac{2f^2 g^2 \sin 2\alpha R \cos \alpha t}{R} dt \quad (2.13)$$

Интегрируя равенство (2.13), получим:

$$V_c = g (\sin \alpha - f \cos \alpha) t + \frac{2f^2 g^2 \sin 2\alpha R \cos \alpha t^2}{R^2} \quad (2.14)$$

Учитывая того, что мгновенный центр скоростей  $P$  находится в точке касания с плоскостью, можем записать:

$$V_c = \omega \cdot R \quad (2.15)$$

$$\omega = \frac{V_c}{R} \quad (2.16)$$

Подставляя значение  $V_c$  из уравнения (2.14) в уравнение (2.15), можно вычислить угловую скорость вращения обрабатываемого объекта, используя формулу (2.17).

$$\omega = \frac{g \times (\sin \alpha - f \cos \alpha) \times t}{R} + \frac{2 \times f^2 \times g^2 \times \sin 2\alpha \times \cos \alpha t^2}{R^2} \quad (2.17)$$

В уравнении (2.17) угол наклона плоскости по отношению к горизонту  $\alpha$  находится в диапазоне от  $5^\circ$  до  $45^\circ$ , ( $5^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ ). Из анализа уравнения следует, что при увеличении угла наклона до значений, близких к  $45^\circ$ , наблюдается рост угловой скорости  $\omega$ .

Например, при  $\alpha = 45^\circ$  угловая скорость вычисляется по формуле:

$$\omega_{45} = \frac{0,707(1-f)gt}{R} + \frac{1,41f^2g^2t^2}{R}.$$

В то же время, при нулевом угле наклона ( $\alpha = 0^\circ$ ), абсолютное значение угловой скорости составляет:

$$\omega_0 = \frac{0,707gft}{R}$$

Из расчетов следует, что частота вращения при  $\alpha=45^\circ$  больше, чем частоты вращения при  $\alpha=0^\circ$ . При меньшем значении частота вращения возрастает абразивный износ, поскольку меньшее значение частота вращения возникает вследствие большего сопротивления качению шарика.

Эксперименты, которые были проведены, также показали, что при малых значениях угла  $\alpha$ , близких к нулю, эффективность переработки и точность формообразования существенно выше, чем при наклоне в  $45^\circ$ .

#### **2.4. Разработка оборудования и технологий формирования шаровидных элементов из полудрагоценных и поделочных материалов**

На рисунке 2.5. изображена схема процесса обработки, в котором сферы, размещённые в гнезде сепаратора, совершают вращательное движение. Эти заготовки движутся по сложной траектории, одновременно вращаясь вокруг собственной оси вращаясь вокруг центральной оси устройства. В процессе обработки на заготовки действуют несколько сил: центробежная сила, прижимающая их к внутренней поверхности барабана: сила трения между заготовками и стенками барабана: сила трения между заготовками и сепаратором, а также сила тяжести.

Под воздействием центробежной силы заготовки прижимаются к инструменту и обрабатываются за счёт скольжения по его поверхности. Производительность процесса зависит от величины прижимающей силы и скорости перемещения заготовок, которые регулируются частотой вращения сепаратора. В рамках исследования проводится анализ динамики обработки и определяется оптимальная скорость вращения сферических заготовок для повышения точности и производительности процесса.

В рассматриваемой системе вращающийся сепаратор, абразивный инструмент и заготовка рассматриваются как единое целое. Для вычисления угловых скоростей вращения изделия и диска применяется теорема изменения кинетического момента системы. Согласно этой теореме, производная кинетического момента системы по времени относительно оси вращения (в данном случае – оси сепаратора) равна алгебраической сумме моментов всех внешних сил, действующих относительно этой оси.

$$\frac{dk_z}{dt} = \sum_{k=1}^n m_z \times (\bar{F} \times k^e) \quad (2.18)$$

где суммарный кинетический момент системы определяется как:

$$K_z = K_{z1} + K_{z2} + K_{z3} \quad (2.19)$$

Здесь  $K_{z1}$ ,  $K_{z2}$  и  $K_{z3}$  обозначают кинетические моменты вращающихся дисков и обрабатываемых объектов.

$$K_z = J_{zi} \times \omega_i; \quad J_{zi} = \frac{m_i \times R_i^2}{2}; \quad \omega_i = \frac{\pi \times n_i}{30}, \quad (2.20)$$

$$K_{z1} = \frac{m_1 \times R^2}{2} \times \frac{\pi \times n_1}{30} = \frac{\pi \times m_1 \times R^2 \times n_1}{60}, \quad (2.21)$$

$$K_{z2} = J_{z2} \times \omega_2; \rightarrow J_{z2} = \frac{m_2 \times R_2^2}{2}; \rightarrow K_{z2} = \frac{m_2 \times R_2^2}{2} \times \omega_2.$$

Поскольку исследуемый объект с массой  $m_3$  выполняет сложное перемещение, то

$$K_{z3} = J_{z3} \cdot \omega_1 + m_3 \cdot V_3 \cdot R_1,$$

$$\text{где } V_3 = \omega_3 \cdot r_3, \rightarrow K_{z3} \frac{\pi m_3 R_1^2 \cdot n_1}{60} + m_3 \cdot \omega_3 \cdot r_3 \cdot R_1;$$

$$K_z = \frac{\pi m_1 R^2 \cdot n_1}{60} + \frac{m_2 R_2^2}{2} \cdot \omega_2 + \frac{\pi m_3 R_1^2 \cdot n_1}{60} + m_3 \cdot \omega_3 \cdot r_3 \cdot R_1 \quad (2.22)$$

Внешние силы, действующие на систему, включают следующее:

$F_{\text{пер}}^n$  – инерционная переносная сила, влияющая на заготовку;

$\bar{P}_1, \bar{P}_2$ , – веса сепаратора и абразивного круга соответственно;

$\bar{F}_{\text{тр}}$  – сила трения, действующая в точке контакта обрабатываемого элемента с инструментом;

$M_{kp}$  – момент сил, запускающий движение системы;

$\bar{P}_3$  – масса обрабатываемой заготовки;

$M_{\text{сопр}}$  – момент сопротивления вращению.

Чтобы вычислить значение переносной инерционной силы, следует воспользоваться формулой 2.23.

$$F_{\text{пер}}^n = -m_3 \times \frac{\pi \times n_1}{30} \times R_1 \quad (2.23)$$

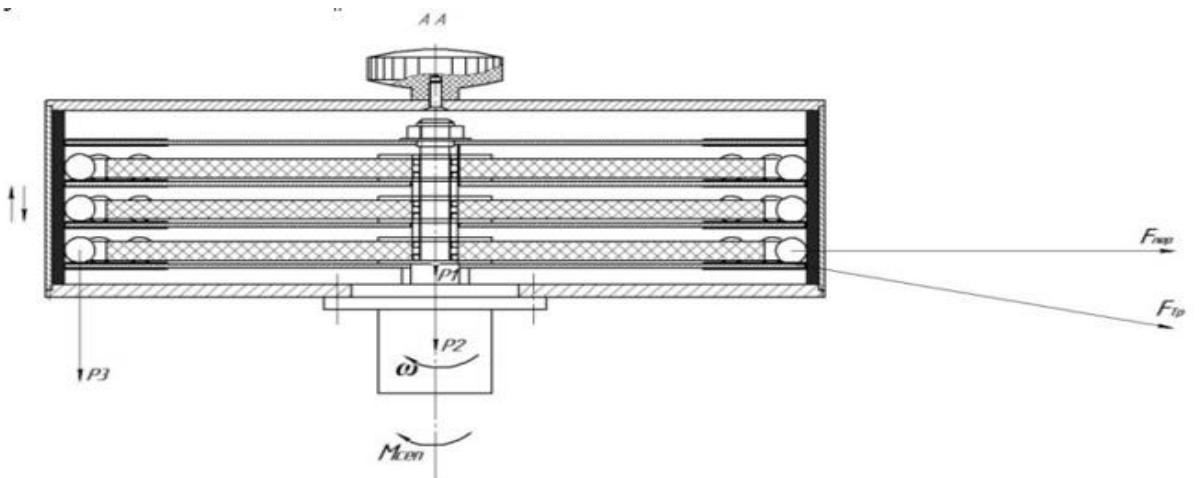
Кориолисова инерционная сила, обозначаемая как  $-F_{\text{кор}}$ , определяется следующим образом:

$$F_{\text{кор}}^u = -m_3 \times \omega_3 \times z_3 \times \frac{\pi \times n_1}{30} \times \sin 90^\circ = -m_3 \times \omega_3 \times z_3 \times \frac{\pi \times n_1}{30} \quad (2.24)$$

Силы, действующие на подшипники, обозначаем как  $\bar{P}_1$  и  $\bar{P}_2$ .

Вычисляем моменты внешних сил относительно оси  $OZ$ . Моменты сил  $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$  равны нулю, так как указанные силы параллельны оси.

$$m_z(\bar{P}_1) = 0; \quad m_z(\bar{P}_2) = 0; \quad m_z(\bar{P}_3) = 0 \quad (2.25)$$



**Рис. 2.5. Схема действия сил при многодисковой центробежной шлифовании шариков**

Момент сил реакции в подшипниках  $R_A$  и  $R_B$  также равны нулю так как эти силы пересекают ось.

$$m_z(R_A) = 0 ; m_z(R_B) = 0 \quad (2.26)$$

$$\sum m_z(\bar{F}_k^e) = M_{kp} - M_{\text{копр}} - F_{\text{тр}} \cdot R_1 \quad \text{так как } m_z(\bar{F}_{\text{копр}}^u) = 0 \quad (2.27)$$

$$F_{TP1} = f \cdot N_1 = f \cdot P_{3 \cos \alpha} = fm_3 g_{\cos \alpha}$$

Отсюда

$$\sum_1^n m_z(F_k^e) = M_{kp1} - M_{\text{копр}} - F_{Tp} \cdot R_1 \quad (2.28)$$

$$M_{\text{копр}} = \delta \cdot N_3 = \delta \cdot P_{3 \cos \alpha}$$

здесь:  $\delta$  – коэффициент скольжения,  $m_z \times (\bar{F}_{\text{копр}}^u) = 0$ , так как вектор проходит через ось OZ, а  $f$  обозначает коэффициент трения, возникающего при взаимодействии заготовки с абразивным кругом.

$$\sum_1^n m_z \times (\bar{F}_k^e) = M_{kp} - \delta m_{3g \cos \alpha} - fm_{3g \cos \alpha} \quad (2.29)$$

Подставив уравнения (2.24) и (2.21) в выражение (2.22), мы получаем:

$$d \left[ \frac{\pi R^2 n_1}{60} (m_1 + m_2) + \frac{m_2 R_2^2}{2} \omega_2 + m_3 \cdot \omega_3 \cdot z_3 \cdot R_1 \right] = (M_{kp1} - \delta m_{3g \cos \alpha} - fm_{3g \cos \alpha}) dt \quad (2.30)$$

Из данного выражения

$$\begin{aligned} m_3 \omega_3 r_3 R_1 &= -\frac{\pi R^{2n}}{60} (m_1 + m_2) - \frac{m_2 R_2^2}{2} \cdot \omega_2 + M_{kp} \cdot t - m_3 g \cos \alpha (\delta + f) t, \\ \omega_{3\text{детал}} &= \frac{M_{kp} \cdot t - m_3 g \cos \alpha (\delta + f) \cdot t - \frac{\pi R^2 n_1}{60} (m_1 + m_3) - \frac{m_2 \cdot R_2^2}{2} \cdot \omega_2}{m_3 \cdot r_3 \cdot R_1} = \\ &\frac{60M_{kp} \times t - 60m_3 g \cos \alpha (\delta + f) \times t - \pi R^2 n_1 (m_1 + m_3) - 30m_2 \times R_2^2 \times \omega_2}{60 \times m_3 \times r_3 \times R_1}, \end{aligned} \quad (2.31)$$

Исходя из этого, можно заключить, что абсолютная скорость вращения элемента будет снижаться при увеличении частоты вращения инструмента (например, шлифовального круга, алмазной планшайбы и т.д.). В то же время возрастает скорость относительного движения деталей по отношению к

инструменту, что в свою очередь способствует увеличению эффективности обработки.

## **2.5. Исследование абразивной галтовки кубических заготовок из полудрагоценных и поделочных камней в центробежных барабанах с подвижным дном**

«Проведённое исследование процесса центробежной абразивной галтовки полудрагоценных и поделочных камней кубической формы в барабанах с вращающимся дном демонстрирует, что данная техника обеспечивает существенно большую эффективность по сравнению с альтернативными методами. Обработка происходит за счет взаимодействия абразивных частиц с заготовками, в результате чего с их поверхностей снимается верхний слой материала из-за резания с использованием свободных абразивов или инструментов. Применение центробежной абразивной галтовки не только увеличивает производительность, но и значительно улучшить качество получаемых изделий» [74–80].

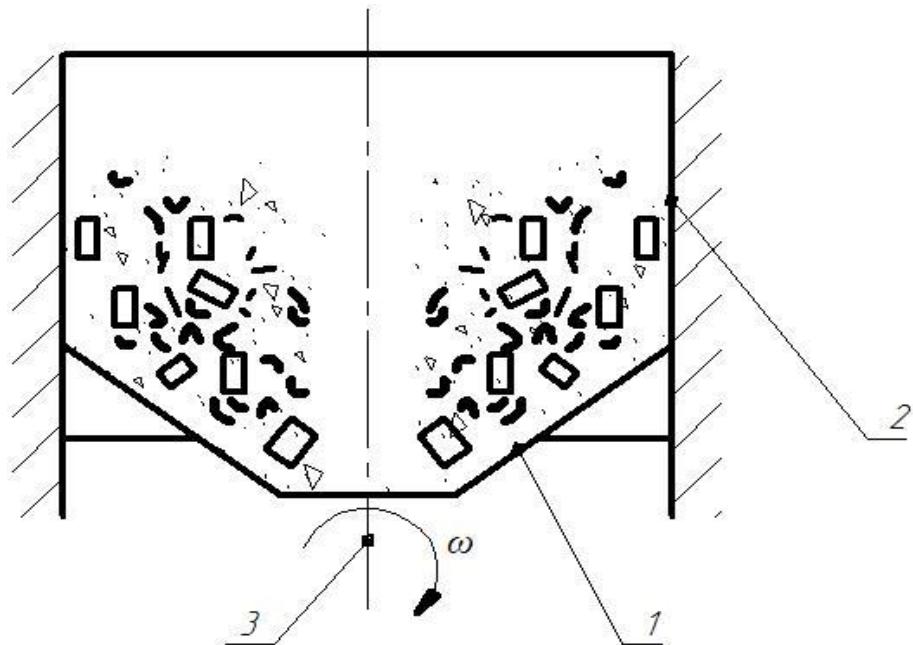
Одной из ключевых особенностей рассматриваемого процесса является возникновение центробежной силы, формирующейся при вращении барабана и зависящей от его угловой скорости. Благодаря конической форме дна барабана, абразивный материал под действием этой силы перемещается вверх по его стенкам (рис. 2.6). Вращение дна, приводимого в движение через вал, вызывает сложное тороидальное перемещение рабочей среды, включающей заготовки, абразивный материал и жидкие компоненты. Такое движение обеспечивает равномерное и объёмное воздействие на обрабатываемые заготовки.

Цель настоящего исследования заключается в изучении закономерностей, определяющих процесс центробежной абразивной галтовки полудрагоценных и поделочных камней кубической формы в барабанных установках с врачающимся дном.

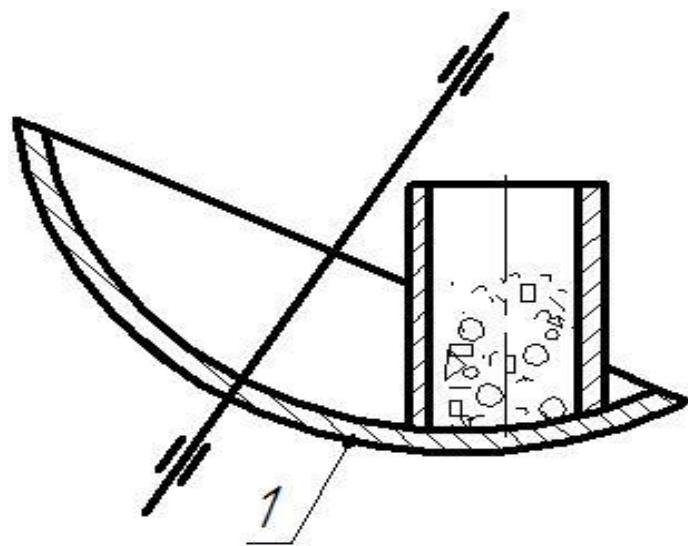
«Используемая схема (рис. 2.7) улучшает обработку элементов за счёт расширения радиуса соприкосновения сферы с чашей и стаканом, а также обеспечивает воздействие центробежных сил в нескольких плоскостях.

Различные устройства, предназначенные для центробежной абразивной обработки, отличаются конструкцией и рабочими характеристиками» [81–85].

В одной из конструкций дно барабана размещено с эксцентрическим смещением относительно его оси, что вызывает дополнительную неуравновешенную силу, повышающую эффективность обработки.



**Рис.2.6. Обработка на барабанах с вращающимся дном и неподвижной обечайкой**



**Рис.2.7. Схематическое представление процессов, происходящих в барабанах с вращающейся основой, оформленной в виде сферической крутящейся чаши.**

Альтернативное устройство [86], предназначенное для данной задачи, включает рабочую камеру, сформированную обечайкой и вращающимся дном. Внутри камеры размещён экран в виде полого усечённого конуса, закреплённый с помощью упругих элементов.

Также известна система центробежной абразивной обработки, в конструкции которой рабочая камера выполнена в виде гибкого (эластичного) контейнера с вращающимся дном [69]. Деформация дна этого контейнера приводит к ускорению заготовок, что способствует их взаимодействию друг с другом. Процесс деформации стенок и дна контейнера выполнен с использованием кривошипного механизма.

Использование ранее описанных методов обработки в процессе галтовки полудрагоценных и поделочных камней выявило их существенный недостаток: низкую производительность и нестабильное качество итогового результата. Внедрение технологий с вращающимся дном, выполненным из абразивного материала, обеспечило повышение эффективности процесса как по скорости обработки, так и по качественным характеристикам получаемых изделий.

## **2.6. Формирование сферических изделий из полудрагоценных и поделочных камней методом центробежной обработки.**

Производство шариков из полудрагоценных и поделочных камней начинается с нарезки исходного материала на кубические заготовки, которые затем используются для формирования сферической формы. При производстве шариков диаметром 20 мм и меньше, округление граней и углов осуществляется с помощью галтовки в барабанах. Этот метод является трудоемким и не всегда обеспечивает необходимое качество обработки. Более эффективным оказывается процесс центробежной абразивной обработки.

Следовательно, необходимо рассмотреть потенциальные способы использования данного метода для создания сферических форм из кубических заготовок. Исследования показали, что режимы обработки существенно воздействуют на качество округления граней и углов этих заготовок.

В отличие от традиционных барабанных методов галтовки, центробежная галтовка демонстрирует производительность, превышающую показатели на 4–6 раз. Это делает ее отличным вариантом для повышения эффективности процессов и снижения затрат на производство. В рамках данного подхода удаление материала осуществляется благодаря трению абразивных частиц о поверхность изделий. При этом центробежные силы способствуют их перемешиванию, что усиливает процесс обработки.

Обработка происходит под действием следующих факторов: количество абразива и его зернистости, режимы обработки, количество загрузки в барабан, характер движения заготовок при обработке, соотношение жидкой и твердой фазы при обработке, объем барабана и степень его заполняемости.

В настоящее время центробежная абразивная обработка применяется для финишной обработки, которая включает в себя уменьшение шероховатости поверхностей деталей, удаление заусенцев, а также округление граней и острых углов изделий. При выполнении таких операций основной акцент не делается на точности формы и размеров.

В работе [87] описан принцип центробежной абразивной обработки, позволяющий достигать высокой производительности и улучшать форму и точность размеров заготовок. Для эффективного применения данного метода при изготовлении идеально круглых шариков из полудрагоценных и поделочных камней исходные материалы должны иметь приблизительно сферическую форму с отклонениями от идеальной сферы не более 2 мм при диаметре около 16 мм. Подготовка заготовок начинается с кубических форм, которые проходят несколько стадий обработки. На первом этапе используется галтовка в горизонтально вращающихся барабанах или центробежная обработка.

С целью экспериментального изучения процесса преобразования кубических заготовок в сферические был разработан и произведен специальный станок (рис. 2.8), на который был получен малый патент на изобретение [88, 89].



**Рис. 2.8. Устройство для многодисковой центробежной абразивной обработки полудрагоценных и поделочных камней**

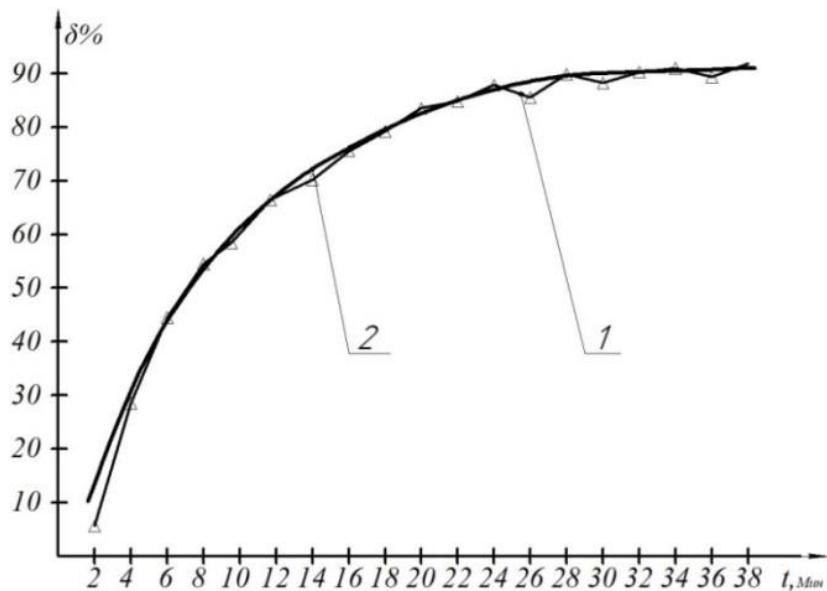
Использованием данного станка проведены экспериментальные исследования процесса исправления формы заготовок кубической формы. Исправление формы заготовок в процессе центробежной галтовки оценивается в процентах по сравнению с исходной погрешностью размеров.

Рисунок 2.9 иллюстрирует данные по исправлению формы и производительности обработки шаров диаметром 10–12 мм. Анализ графика свидетельствует, что по истечении 25 минут обработки процесс стабилизируется, что означает минимальное влияние дальнейшего увеличения времени обработки на улучшение геометрии заготовок.

На начальной стадии обработки форма заготовок изменяется наиболее активно. Однако с течением времени интенсивность исправления снижается и постепенно сводится к минимуму. Это обеспечивает равномерную обработку всей поверхности заготовки, что является важным условием для соответствия стандартам качества. Так, например, для заготовки из лазурита средний исходный диаметр составлял 11,33 мм, при этом минимальное значение было 10,73 мм, а максимальное – 19,37 мм. Разница между самым большим и самым маленьким размерами составила 8,64 мм, что свидетельствует о значительных отклонениях в исходных размерах.

По истечении 25 минут обработки средний размер партии уменьшился до 10,2 мм, причем минимальный размер составил 9,85 мм, а максимальный – 10,7 мм. Таким образом, разница между наименьшим и наибольшим размерами уменьшилась до 0,85 мм, что говорит о значительном улучшении равномерности размеров. В этом случае исправление формы составило 90%, что является весьма высоким показателем эффективности обработки.

Важно отметить, что дальнейшая обработка после достижения 25 минут не приводит к значительному исправлению формы, что подчеркивает необходимость оптимизации времени обработки для достижения наилучших результатов. Это открывает возможности для дальнейших исследований в области центробежной галтовки, включая изучение влияния различных параметров, таких как скорость вращения, тип абразивного материала и форма контейнера, на эффективность исправления формы. Оптимизация этих параметров может привести к улучшению качества обработки и снижению затрат на производство, что является важным аспектом в современных условиях конкурентного рынка.



**Рис.2.9. График зависимости исправление формы от времени при обработке лазурита;**

Примечание: 1. Расположение экспериментальных точек 2. Аппроксимация результатов эксперимента.

В исследовании [17] представлена новая методика обработки, основанная на центробежном абразивном способе, который показывает высокую производительность и способствует улучшению формы заготовок, а также повышению их размерной точности. Данный метод был успешно испытан на шариках из полудрагоценных и декоративных камней, что открывает новые возможности в ювелирном производстве и обработке полудрагоценных и поделочных материалов.

Обработка шариков проходит по следующему алгоритму. Заготовки, выполненные в виде округлых кубиков, устанавливаются в специальные ячейки сепаратора, размещенного внутри абразивного шлифовального устройства (как показано на рисунке 2.10). Важно отметить, что абразивный инструмент может оставаться неподвижным или вращаться с определенной частотой, в то время как сепаратор также получает вращательное движение. Это создает уникальные условия для обработки заготовок.

Когда заготовки врачаются вместе с сепаратором, центробежные силы начинают действовать на них, прижимая их к поверхности инструмента. Этот процесс не только обеспечивает равномерное распределение абразивного воздействия на поверхность заготовок, но и значительно ускоряет процесс шлифовки и полировки. В результате, шарики получают более высокую степень гладкости и улучшенные оптические характеристики, что особенно важно для полудрагоценных и поделочных, которые должны привлекать внимание своим блеском и цветом.

Таким образом, предложенная схема обработки не только повышает качество конечного продукта, но и оптимизирует производственные процессы, что делает её привлекательной для широкого круга производителей в ювелирной отрасли.

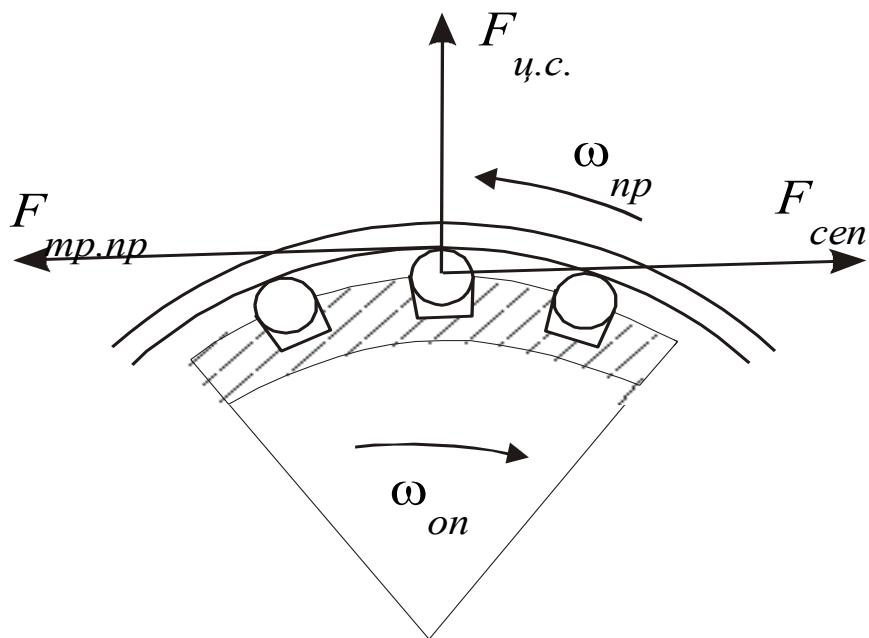
Силы, действующие при обработке следующие: центробежная сила инерции; - сила трения с сепаратором; - сила трения и инструментом.

Особенности данного способа обработки следующие:

1. Обработка производится инструментом имеющим форму втулки, а прижим заготовок с инструментом имеет упругий характер.

2. Имеется возможность управлять силой прижима бесступенчато и в широких пределах.

3. Частота вращения заготовок регулируется отдельно и широком диапазоне путём изменения скоростей вращения сепаратора и инструмента.



**Рис. 2.10. Схема работы сил при процессе центробежной абразивной обработки шариков.**

Центробежная сила, обеспечивающая прижатие заготовок к рабочей поверхности инструмента, определяется следующим уравнением:

$$F_{ц.с} = m_{заг} \times \omega_{сеп}^2 \times R_{сеп} \quad (2.32)$$

где:  $F_{(ц.с)}$  – центробежная сила направлена по радиусу вращения сепаратора;

$m_{заг}$  – масса заготовки;

$R_{сеп}$  – расстояние от центра вращения сепаратора до центра массы заготовок.

Как видно из формулы (2.32), сила прижима заготовок к инструменту пропорциональна квадрату угловой скорости сепаратора. Частоту вращения сепаратора можно использовать для контроля силы прижима заготовки к инструменту.

Частота вращения заготовки определяется значением и направлением вращения как сепаратора, так и инструмента. Исходя из формулы (2.33), можно сделать вывод, что частота вращения заготовки относительно собственной оси  $\omega_{заг}$  может регулироваться независимо от уровня прижимной силы, поскольку определяется соотношением угловых скоростей сепаратора и инсертса, а также их радиусов.

$$\omega_{заг} = \frac{(\omega_{сеп} \pm \omega_{инс}) \times R_{инс}}{R_{заг}} \quad (2.33)$$

в этой формуле  $\omega_{инс}$  – скорость вращения инструмента;

$\omega_{сеп}$  – скорость вращения сепаратора;

$R_{инс}$  – радиус инструмента;

$R_{заг}$  – радиус заготовки.

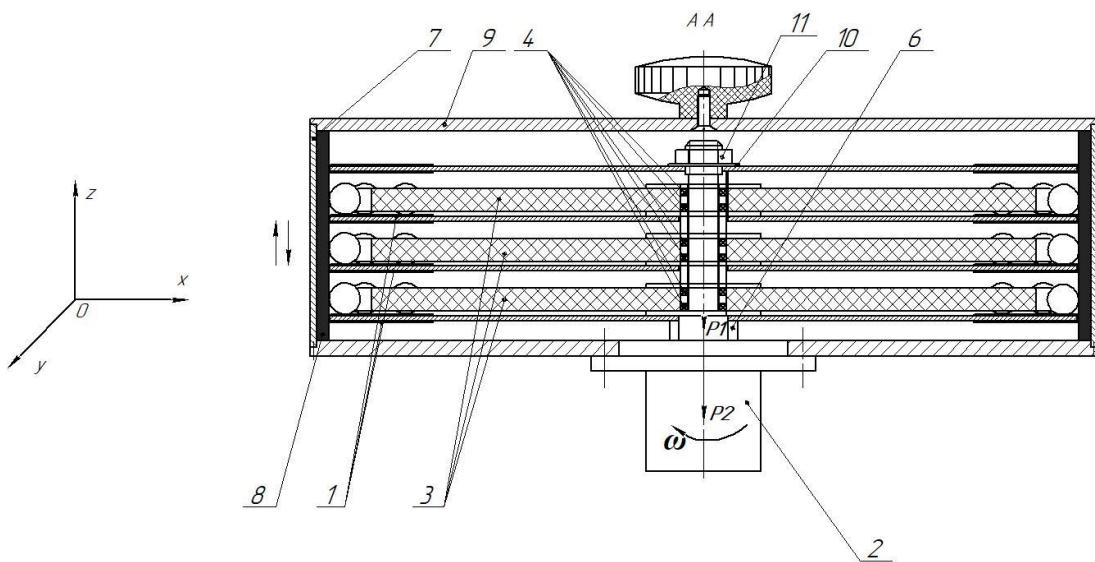
В качестве примера расчёта прижимной силы заготовок можно использовать формулу (2.32). При условии, что сепаратор вращается с частотой 1000 об/мин, его диаметр составляет 300 мм, а масса одной заготовки – 12 г, сила её прижатия к рабочей поверхности инструмента достигает 39,4 Н.

Обработка шариков из полудрагоценных и поделочных камней осуществляется путём размещения заготовок в пазах сепаратора, где они свободно вращаются под действием трения с абразивным инструментом. Центробежная сила, возникающая при вращении сепаратора, прижимает заготовки к стенкам барабана, который движется вверх–вниз в вертикальной плоскости. Для повышения трения на внутреннюю поверхность барабана наклеена резина. За счёт одновременного воздействия трения от круга, сепаратора и барабана, заготовки вращаются по трём осям, что обеспечивает равномерную обработку. Конструкция станка показана на рисунках 2.11 (разрез А–А) и 2.12 (вид сверху).

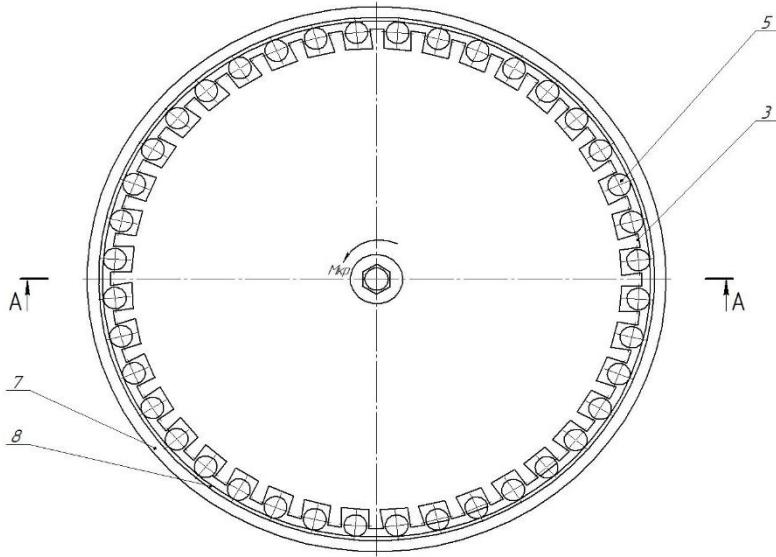
Данное устройство состоит из абразивных инструментов (1), которые приводятся в движение валом (2). Над абразивным кругом расположены сепараторы (3), установленные на подшипниках качения (4) и имеющие небольшой зазор, поддерживаемый буртиком (6). В отличие от абразивного инструмента, сепараторы свободно вращаются вокруг вала. Во время работы

сепараторы (3) приобретают скорость, отличную от скорости вращения абразивного круга (1), что вызывает относительное скольжение между инструментом и заготовкой и способствует ускорению обработки. На рисунке 2.12 показаны пазы на сепараторах (3), предназначенные для размещения заготовок (5). Барабан (7) совершает возвратно – поступательные движения в вертикальной плоскости. Его внутренняя поверхность покрыта материалом с высоким коэффициентом трения (8). Для предотвращения выпадения заготовок во время работы барабан закрыт крышкой (9).

Процесс обработки материалов осуществляется следующим образом. Сначала осуществляется открытие крышки (9), после чего в специальные пазы сепаратора (3) помещаются обрабатываемые заготовки (5). Данные заготовки представляют собой округлые кубики, изготовленные из полудрагоценных и поделочных камней. При запуске вращения сепаратора (3) заготовки, под действием центробежной силы, прижимаются к внутренней барабана, облицованной резиновым покрытием. Возникающее трение приводит к их вращению вокруг вертикальной оси ОY. В то же время взаимодействие с абразивным инструментом вызывает вращение заготовок вокруг горизонтальной оси ОХ. Дополнительно, за счёт возвратно – поступательного движения барабана, обеспечивается вращение заготовок вокруг оси ОZ.



**Рис.2.11. Устройство для шлифовки сферических тел.**



**Рис.2.12. Устройство для шлифовки сферических тел. (вид сверху).**

1). Барабан вращается с угловой скорость  $\omega$ . Рассмотрим движение шарика по стенке сепаратора. Движение шарика вместе с барабаном является сложным движением.

Обозначим через  $R_x$  радиус вращения шарика вместе с барабаном. Переносная скорость вращения шарика равно:

$$V_{\text{ш}}^e = \omega \times R_x, \quad (2.34)$$

Согласно теореме Кориолиса, абсолютное ускорение шарика равна:

$$\bar{a} = \bar{a}_r + \bar{a}_e + \bar{a}_c, \quad (2.35)$$

где:  $\bar{a}_r$ - относительное ускорение шарика;

$\bar{a}_e$ - переносное ускорение;

$\bar{a}_c$ - кориолисово ускорение.

Умножая обе части равенства (2.35) на массу –  $m$  получим дифференциальное уравнение относительного движения шарика.

$$m\bar{a} = m\bar{a}_r + m\bar{a}_e + m\bar{a}_c, \quad (2.36)$$

$$m\bar{a}_r = m\bar{a} - m\bar{a}_e - m\bar{a}_c, \quad (2.37)$$

$$m\bar{a} = \sum_{k=1}^n F_k^e;$$

$- F_k^e$  –внешние активные действующие силы - это вес шарика –  $\bar{P}$ , сила трения — $\bar{F}_{\text{тр}}$ ;

$$F_{\text{тр}} = f \times N \times P \cos \alpha \quad (2.38)$$

$f$ -коэффициент трения шарика о перегородку;  $N$ -сила давления.

Введём обозначения:

$$\begin{cases} -m\bar{a}_e = \bar{F}_e^u \\ -m\bar{a}_c = \bar{F}_c^u \end{cases} \quad (2.39)$$

Соответственно переносная сила инерции и кориолисова сила инерции.

Уравнение движения шарика в дифференциальной форме следующий: уравнение относительного движения шарика имеет вид:

$$m\bar{a}_r = \sum_{k=1}^n \bar{F}_k + F_e^u + F_c^w \quad (2.40)$$

поскольку, барабан вращается с постоянной угловой скоростью равной  $\omega$ , то переносное угловое ускорение  $\bar{a}_e = \bar{a}_e^u$ ,

$\bar{a}_e = \omega^2 R_x$  и направлено от центра масс шарика к центру вращения барабана:

$\bar{F}_e^u$ -направлено против вектора  $\bar{a}_e$ ; т.к.  $\omega \perp \bar{V}_r$ , то кориолисово ускорение  $\bar{a}_c \perp \bar{V}_r$ , Кориолисова сила инерции направлено против вектора  $\bar{a}_c$ ;

Изобразим на чертеже направления этих сил, где

$$F_e^u = m\omega^2 R_x \quad (2.41)$$

$$F_c^u = m2\omega \times V_r \sin 90^\circ = 2m\omega \times \omega_{\text{ш}} \times r_{\text{ш}} \times 1 \quad (2.42)$$

здесь  $\omega_{\text{ш}}$ - угловая скорость вращения шарика вокруг оси, проходящей через его центр:  $r_{\text{ш}}$ - радиус шарика. Так как шарик ещё вращается вокруг своей оси, то проектируя обе части равенства (2.40) на оси координат  $O_x$ ,  $O_y$  и учитывая вращение шарика вокруг своей оси получим следующие дифференциальное уравнения движения шарика.

$$\begin{cases} m\ddot{X}_c = -P \sin \alpha + F_e^u - F_{\text{тр}} \\ m\ddot{Y}_c = P \cos \alpha + F_c^u \\ J_{zc} \frac{d^2 u}{dt^2} = \sum_{k=1}^n m_{zc} \times [\bar{F}_k^e] \end{cases} \quad (2.43)$$

2). Момент инерции однородного шарика равен

$$J_{zc} = \frac{mr_{\text{ш}}^2}{2} \quad (2.44)$$

Подставляя (2.44) в (2.43), получим следующие дифференциальные уравнения движения шарика:

$$\begin{cases} m\ddot{X}_c = -P \sin \alpha + m\omega^2 R_x - fP \cos \alpha \\ m\ddot{Y}_c = P \cos \alpha + 2m\omega \times \omega_{ш} \times r_{ш} \times 1 \\ \frac{mr_{ш}^2}{2} = \frac{d^2u}{dt^2} = fP \cos \alpha \times r_{ш}, \end{cases} \quad (2.45)$$

Пролетая через перегородку шарик движется по поверхности барабана, движение шарика по поверхности барабана является плоским, кроме этого, он вращается вместе с барабаном.

Изобразим на чертеже действующие силы:  $\bar{P}$ - сила тяжести шарика;  $\bar{F}_e^u, \bar{F}_c^u$ - переносная сила инерции, кориолисова сила инерции соответственно,  $\bar{F}_{тр}$ -сила трения. Проектируя эти силы на оси координат, получим следующие дифференциальные уравнения движения шарика по поверхности барабана:

$$\begin{cases} m\ddot{X}_c = -P + F_e^u + F_c^u \\ m\ddot{Y}_c = F_{тр} \\ \frac{mr_{ш}^2}{2} = \frac{d^2u}{dt^2} = +F_{тр} \times r_{ш}, \end{cases} \quad (2.46)$$

Здесь:

$$F_{тр} = f \times N = fm g \quad (2.47)$$

3). Интегрируя эти дифференциальные уравнения получим:

$$\begin{aligned} m\ddot{Y}_c &= fm g \\ \ddot{y}_c &= fg \\ \dot{y}_c &= fgt + c_1 \\ y_c &= fg \frac{t^2}{2} + c_1 t + c_2 \end{aligned}$$

Начальные условия: при

$$t_0 = 0, \quad V_{cy} = 0 \Rightarrow c_1 = 0. \quad y_c = 0 \Rightarrow c_2 = 0: \quad y_c = fg \frac{t^2}{2}$$

$$\frac{mr_{ш}^2}{2} \frac{d\omega_{ш}}{dt} = fm g \times r_{ш}$$

$$\int_0^{\omega_{ш}} r_{ш} d\omega_{ш} = \int_0^t 2fg dt$$

$$r_{ш} \omega_{ш} = 2fgt$$

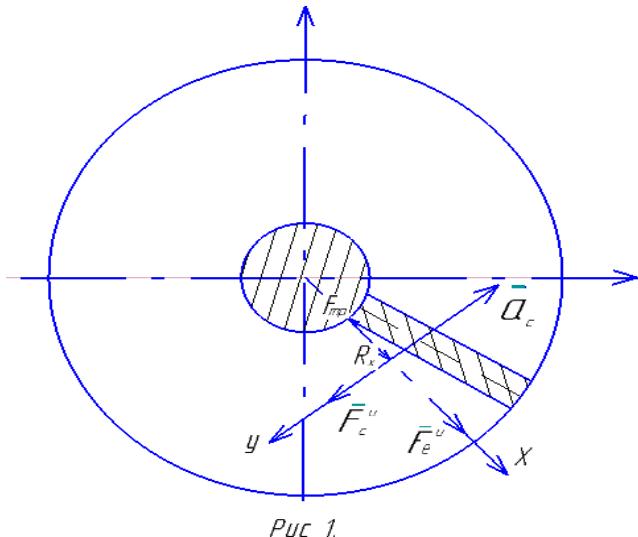
$$V_r = 2fgt.$$

Подставляя это значение  $V_r$  в первое дифференциальное системы (2.46) получим:

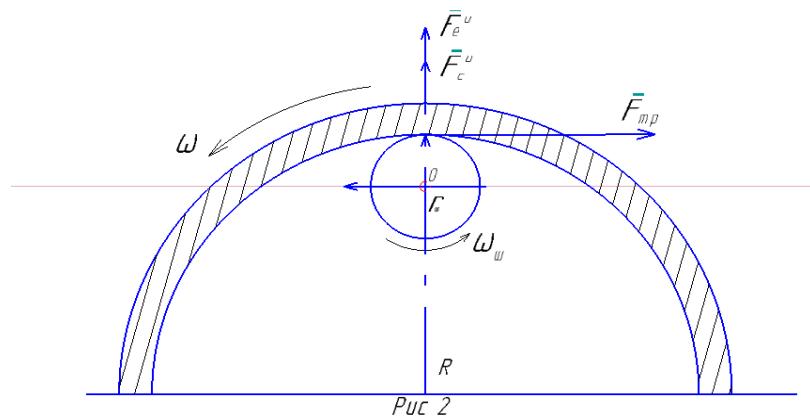
$$\begin{aligned} m\ddot{X}_c &= -mg + m\omega^2(R - r_{\text{ш}}) + 2\omega \times 2fgt \times m \\ \ddot{X}_c &= 4\omega fgt - g + \omega^2(R - r_{\text{ш}}) \\ \dot{X}_c &= 4\omega f g \frac{t^2}{2} - gt + \omega^2(R - r_{\text{ш}}) \times t \\ X_c &= 2\omega f g \frac{t^3}{3} - g \frac{t^2}{2} + \omega^2(R - r_{\text{ш}}) \times \frac{t^2}{2}; \end{aligned}$$

Т.к. здесь  $C_3 = 0$ ;  $C_4 = 0$ .

$$r_{\text{ш}} \times \frac{du}{dt} = 2fgt \Rightarrow u = \frac{2fgt^2}{2 \times r_{\text{ш}}} = \frac{fgt^2}{r_{\text{ш}}}.$$



**Рис. 2.13. Взаимодействия шарика с стенкой сепаратора**



**Рис. 2.14. Взаимодействия шарика с стенкой барабана и абразивным кругом.**

$$\dot{X}_c = 4\omega f g \frac{t^2}{2} - gt + \omega^2(R - r_{ш}) \times t$$

$$\dot{Y}_c = fgt$$

Чтобы образователя шарик правильной геометрической формы, необходимо, чтобы происходило одновременное вращения шарика вокруг двух осей  $X_c$  и  $Y_c$  одинаковой угловой скоростью  $\omega_x = \omega_y$ . Это возможно, когда скорости  $\dot{X}_c$  и  $\dot{Y}_c$  будут равны между собой, так как  $\omega_x = \frac{\dot{X}_c}{r_{ш}}$  и  $\omega_y = \frac{\dot{Y}_c}{r_{ш}}$

Исходя изданного условия запишем

$$u \omega f g \frac{t^2}{2} - gt + \omega^2(R - r_{ш}) \times t = fgt$$

Отсюда

$$f = \frac{gt + \omega^2(R - r_{ш})}{4\omega^2 g \frac{t}{2} - g}$$

Коэффициент трения  $f$  зависит от материала контактирующие с шариком и поверхности барабана.

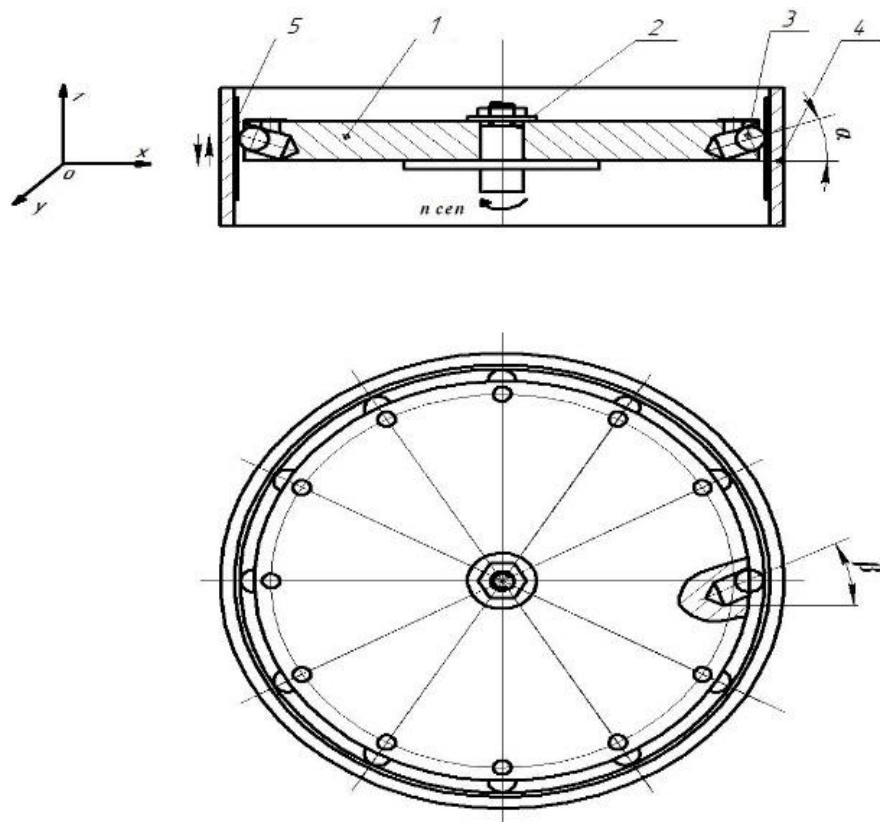
## 2.7. Центробежная абразивная шлифовка и полировка сферических элементов

Шарики из полудрагоценных и поделочных камней являются основным элементом множества ювелирных изделий, таких как бусы, четки и ожерелья. Обычно они состоят из множества шариков, и процесс их производства довольно сложен. Традиционные технологии не всегда гарантируют получение шариков с идеальной геометрической формой. Рассмотрим альтернативный метод, который отличается от привычного. Этот метод обработки шариков включает в себя создание канавок между верхней и нижней пластинами. Этот подход широко используется для обработки полудрагоценных и декоративных камней [16].

Недостатками указанных методов являются их низкие показатели эффективности, неустойчивость формы и размеров получаемых шариков, а также повреждения шариков, возникающие из-за значительных нагрузок во время обработки.

Существуют методы центробежной абразивной обработки, при которых заготовки и абразивная масса загружаются в ёмкость, совершающую планетарное движение – одновременное вращение вокруг собственной оси и вокруг центральной оси.

Под воздействием переносных и относительных инерционных сил происходит активное смешение заготовок с абразивным материалом, что способствует их обработке. В настоящее время методы центробежной абразивной обработки, предназначенные для изделий из полудрагоценных и поделочных камней, практически не используются. Основная причина этого заключается в недостаточной исследовательской базе по данным технологиям. При проведении финальной обработки шариков из полудрагоценных и поделочных материалов мы пользовались схемой, изображенной на рисунке 2.15.

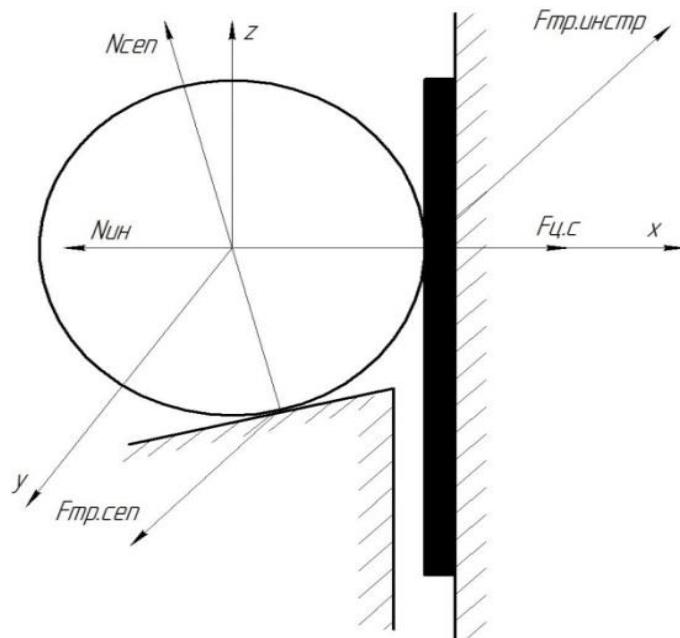


**Рис. 2.15. Схема устройства для центробежной обработки шариков**

Устройство включает в себя сепаратор (1), который установлен на валу (2). Заготовки (3) размещаются в специальных гнездах сепаратора (1). При вращении сепаратора заготовки, испытывая действие центробежной силы,

прижимаются к поверхности барабана, облицованной абразивной лентой (5). Для равномерного износа абразивного материала и увеличения срока службы инструмента барабан приводится во возвратно–поступательное движение в вертикальной плоскости.

На рисунке 2.16 показаны силы, которые действуют на шарик во время его обработки.



**Рис.2.16. Схема воздействия сил в процессе центробежной абразивной обработки.**

Сепараторное гнездо выполнено с наклоном как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, что обеспечивает трехосное вращение заготовок и их обработку по всей площади поверхности. Возвратно – поступательное движение барабана и вращательной движение сепаратора осуществляется от разных приводов, поэтому их можно регулировать независимо и в широких переделах.

При обработке заготовки действуют следующие силы:

$F_{(ц.c)}$  - представляет собой центробежную силу, действующую на заготовку;  $F_{(тр.сеп)}$  - обозначает силу трения между заготовкой и сепаратором;  $F_{(тр.инстр)}$  - соответствует силе трения, действующей на заготовку во время обработки с инструментом;  $N_{(сеп)}$  – прижимная сила, направленная

перпендикулярно к поверхности стенки сепаратора;  $N_{(инс)}$  – сила тяжести, действующая на заготовку.

Под действием центробежной силы  $F_{(ц.с.)}$  заготовки прижимаются к поверхности инструмента. Сила трения в этом случае рассчитывается по формуле:  $F_{(mp)} = f \times F_{(у.с.)}$ ; где  $f$  – коэффициент трения между заготовкой и инструментом. Возникающая сила трения вызывает вращение заготовки (сферы) вокруг оси  $OZ$ . Изменяя угол наклона отверстий сепаратора, можно изменить направление действия силы  $F_{(тр.сеп.)}$ . В совокупности с силой трения  $F_{(тр.инс)}$  это создаёт момент пары сил, вызывающий вращение заготовки также вокруг осей  $OX$  и  $OY$ .

Возвратно – поступательное движение инструмента с барабаном вызывает колебательное вращение вокруг оси  $OY$ , что также способствует обработке заготовки по всей поверхности.

Сила прижима заготовки к поверхности инструмента и скорость относительного скольжения – инструмент определяют производительность обработки. Для достижения наибольшую производительность и управление качеством обработки необходимо, регулировать эти факторы независимо друг от друга.

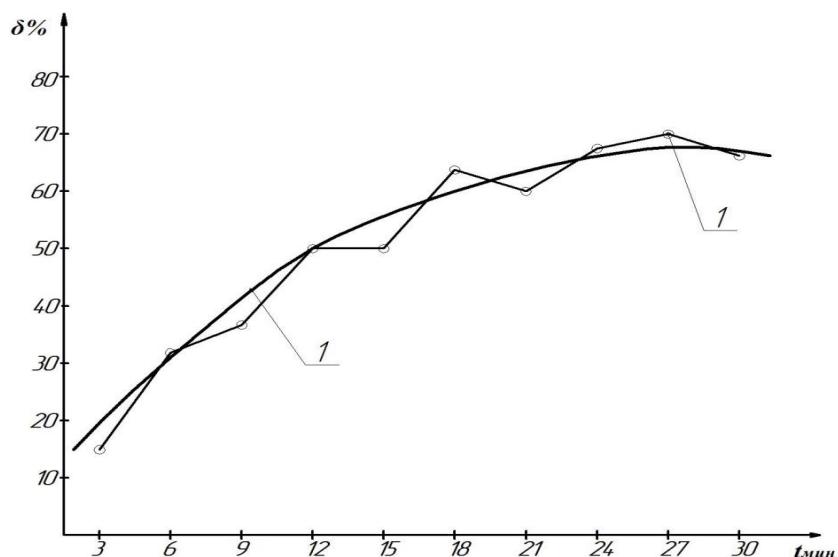
Сила прижатия деталей к рабочей поверхности инструмента зависит от скорости вращения сепаратора. Эта сила может быть изменена в широких пределах и плавно отрегулирована путем настройки частоты вращения сепаратора. Частота вращения заготовок контролируется вращением инструмента. В случае, когда направление вращения сепаратора совпадает с направлением вращения инструмента, угловая скорость вращения заготовки определяется разницей между частотой вращения инструмента и сепаратора, а также диаметром сферической заготовки и радиусом рабочей поверхности инструмента.

Когда направление вращения сепаратора и инструмента противоположны, скорость вращения заготовки определяется суммой частот вращения инструмента и сепаратора, а также размером заготовки и радиусом рабочей поверхности инструмента. Это создает возможность для разнообразных

условий обработки. К примеру, при малом усилии крепления заготовки можно достичь более высокой скорости ее вращения или наоборот, можно применять значительное усилие к заготовке при минимальных частотах ее вращения.

Были исследованы зависимости изменения формы заготовок (в направлении приближения к сферичности) от времени обработки при применении рассматриваемого метода (рис. 2.17). Заготовки с исходной некруглостью до 1,6 мм, размещенные в гнездах сепаратора, обрабатывались в течение 30 минут с измерением исходной формы каждые 3 минуты.

Результаты проведенных измерений показали, что изменение геометрии в ходе обработки форма заготовок улучшается в среднем на 80 % от исходной некруглости. Например, при начальной некруглости 1,5 мм остаточное значение после 30 минут обработки составляет 0,3 мм.



**Рис. 2.17. Исследование зависимости исправления формы шаровидных заготовок с средним исходным отклонением формы до 1,6 мм.**

Этот метод обработки также может быть применён при формировании шаровидных заготовок из полудрагоценных и поделочных камней в шары, а затем для их полировки, заменив абразивную насадку 5 (рис. 2.15) на полировальный инструмент.

## 2.8. Способ обработки на многодисковом галтовочном станке

Процесс изготовления сферических изделий из полудрагоценных и поделочных камней проходит в два основных этапа. На первом этапе

происходит округление углов кубиков, а на втором - придание им шаровидной формы. Обычно процесс формирования круглых заготовок осуществляется посредством галтовки, которая часто выполняется с использованием барабанов с горизонтальным или наклонным вращением. Тем не менее, этот подход обладает низкой эффективностью и не всегда дает нужную форму конечных изделий. Новое устройство позволяет изготовить шарообразные объекты из кубических заготовок, избегая этапа обработки граней.

«Схема конструкции станка представлена на рисунке 1. Основными элементами станка является: корпус (1), электродвигатель (2), ременная передача (3), шпиндель (4), абразивные диски (5), барабан (6), резиновое покрытие (7), крышка (8) и электронное устройство для регулировки частоты вращения электродвигателя (9).

Электродвигатель (2) размещён внутрь корпуса (1). На его валу и на шпинделе станка установлены шкивы, соединённые приводным ремнём. Абразивные диски (5) закреплены на шпинделе (4). Сверху на барабан (6) устанавливается крышка (8), которая предотвращает выпадение заготовок из верхнего диска и обеспечивает их надёжную фиксацию в процессе обработки.

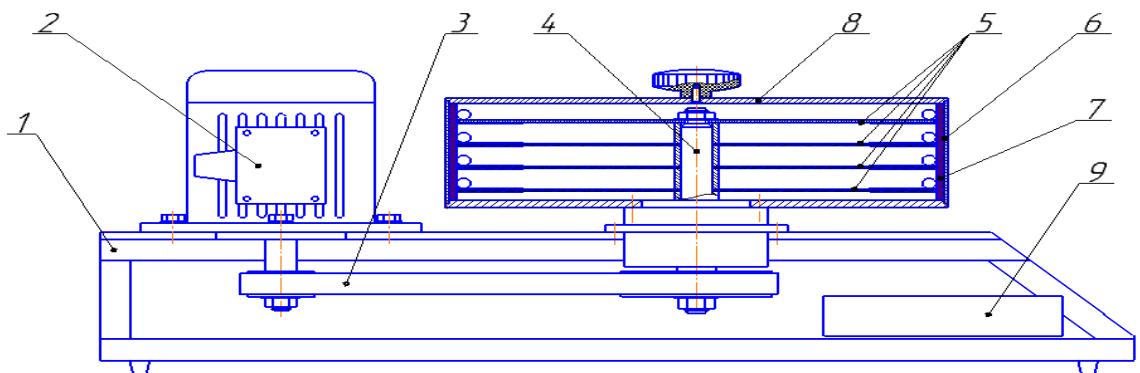
При обработке в начале заготовки размещают над инструментами (алмазными планшайбами или абразивными дисками). Абразивные инструменты приводятся во вращение с помощью шпинделя (4), который получает движение от электродвигателя (2) через ременную передачу. Скорость вращения регулируется электронным контроллером (9), что позволяет задавать оптимальные режимы обработки. В процессе работы заготовки, следя за вращающимся инструментом, под действием центробежной силы смещаются от центра к краям. При контакте с резиновым покрытием барабана их движение относительно барабана замедляется, в результате чего возрастает скорость их скольжения по поверхности инструмента. Это способствует увеличению интенсивности обработки» [5-А; 8-А].

Представленная конструкция позволяет значительно повысить производительность и точность при обработке изделий, таких как шарики из полудрагоценных и поделочных камней. Устройство обеспечивает расширение

технологических возможностей, позволяя совмещать процессы формирования, черновой и чистовой обработки.

С помощью этого устройства возможно одновременно обрабатывать камни, обладающие различными размерами и физико-химическими характеристиками. Эффективность использования данного оборудования особенно высока при производстве разнообразных товаров, включая изделия, относящиеся к ювелирной промышленности.

Производительность обработки определяли с помощью взвешивания. Оценивалась масса группы деталей до и после их обработки. С учётом того, что количество обрабатываемых материалов может различаться в каждой партии, для корректного сопоставления результатов производительность рассчитывалась как процентное изменение массы относительно её начального значения. Изменение формы также оценивалось относительно исходной формы в процентах.



**Рис.2.18. Схема устройства для многоинструментальной центробежной обработки**

Исследование зависимости объема съема материала от продолжительности обработки. Одним из значимых параметров, определяющих эффективность и качество обработки, является её продолжительность. В ходе эксперимента была поставлена задача проанализировать, как время обработки влияет на объем съема. Эксперименты проводились на различных типах материалов и с использованием разнообразных технологий обработки, что позволило получить полное представление о влиянии временных параметров на эффективность процесса.

Исследования показали, что при одновременном использовании нескольких инструментов эффективность обработки значительно возрастает. Это связано с тем, что каждый инструмент выполняет свою задачу в определенном диапазоне параметров, что обеспечивает более равномерную и качественную обработку материала. В ходе экспериментов были изучены ключевые параметры, такие как линейная скорость инструмента, размер зерна абразива и время обработки, что позволило выявить оптимальные условия для достижения наилучших результатов. Величины этих факторов, следующие: продолжительность обработки 10-60 минут; зернистость абразива 600мкм; скорости резания-7,85м/сек, 13,8м/сек, 15,7м/сек.

Обработка проводилась как в сухих, так и в жидких условиях. Полученные в ходе экспериментов данные были использованы для построения графиков, которые показали, что в исследуемых режимах объём материала пропорционально увеличивается с ростом времени обработки. Для представления этих результатов в виде аналитических выражений применён метод наименьших квадратов. Уравнения, описывающие зависимость производительности от времени обработки при различных скоростях вращения инструмента, приведены в главе 4 данной работы.

Проведено исследование влияния линейной скорости инструмента на производительность обработки.

Линейная скорость инструмента  $V$  — это длина пути, которую проходит точка находящаяся на наибольшем диаметре инструмента за 1 секунда. Проведены экспериментальные исследования влияние скорости резания на производительность обработки. Скорость резания варьировался в диапазоне от 2 до 28 м/сек. Максимальная скорость инструмента ограничивалася показателями поломки исходных заготовок. Скорость ограничивалася возрастание поломки до 5%. Результаты эксперимента приведены в главе 4.

## **2.9. Заключение к главе II**

1. При производстве шариков из полудрагоценных и поделочных камней начальные заготовки изготавливаются в форме кубов. Во время

процесса галтовки осуществляется значительное снятие углов и граней кубов, что делает их более округлыми и приближенными к форме шариков. Уровень снятия материала в данном процессе зависит от кинематики и условий обработки.

2. К факторам, влияющим на уровень снятия материала при обработке, относятся: скорость движения инструмента, объем загруженного материала, соотношение жидкой и твердой фаз в процессе обработки, а также количество абразивного материала на каждый килограмм массы исходных заготовок.

3. Выполнен теоретический обзор методов превращения кубических заготовок в изделия сферической формы. Рассмотрены технологии обработки в горизонтальных галтовочных барабанах, а также в барабанах с прямоугольными кольцевыми канавками. Проанализированы процессы центробежной абразивной обработки на установках с вращающимся дном и применением сепараторов. Также исследованы способы механической обработки с использованием специализированных станков с направляющими пластинами и методы многодисковой центробежной обработки с абразивным инструментом

4. Многоинструментальное центробежное устройство существенно повышает производительность и точность обработки изделий, таких как шарики из полудрагоценных и поделочных камней. Различные диски могут быть оснащены абразивами различной зернистости, что позволяет последовательно выполнять все стадии обработки.

5. На этом устройстве возможно одновременно обрабатывать камни разного размера и с различными физико-химическими свойствами, используя разные диски. Использование данного устройства наиболее целесообразно при разнообразном ассортименте изделий, особенно в ювелирном производстве. Использование современных технологий, таких как многоинструментальное центробежные устройства, позволяет значительно повысить эффективность и качество производства шариков из полудрагоценных и поделочных камней, сокращая время обработки и минимизируя потери материала.

## **Глава 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

В данной главе рассмотрены вопросы методика проведения экспериментальных исследований, особенности оборудования и инструменты применяемой при обработке и контроля качества образцов.

Целью экспериментальных исследований выявление возможности и целесообразности применения способов центробежной абразивной обработке при обработке высокотвердых и одновременно хрупких материалов какими являются самоцветные камни. Методика проведения экспериментов и обработка результатов экспериментальных исследований разработаны применительно к вновь разрабатываемых технологических процессов и оборудования применяемое при изготовлении изделий из самоцветных камней. Важным вопросом решаемой при этом является повышение производительности и снижение себестоимости изготавляемых изделий.

### **3.1. Оборудование, образцы, применяющиеся при экспериментальном исследовании процесса обработки**

Экспериментальные исследования обработки шариков из самоцветных камней проведены на следующих оборудований: галтовочный барабан объемом 10дм<sup>3</sup>, галтовочный барабан, снабженный кольцевыми дорожками, планетарно-центробежный станок, многоинструментальный центробежно-абразивный станок. В качестве инструментов использовались алмазные планшайбы, алмазные отрезные круги, стандартные абразивные круги, также свободный абразив.

Производительность процесса обработки определялось по потери веса при обработке. Для этого обрабатываемая партия заготовок взвешивают до и после обработки. Величина съёма материала и производительность обработки определяются на основе изменения массы заготовок. Для получения объективной оценки производительности, особенно в случаях, когда начальная масса заготовок различается при каждой загрузке, используется относительное

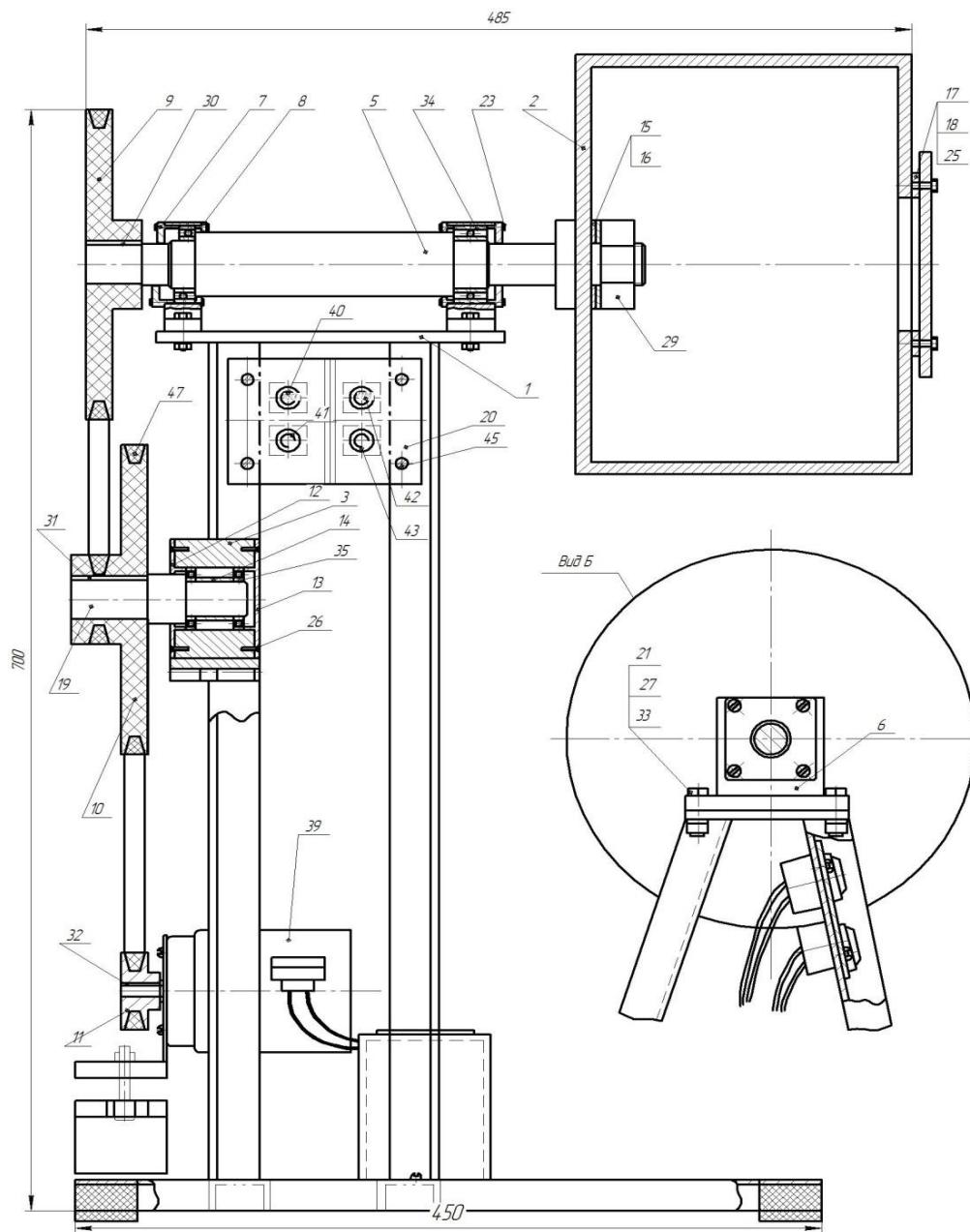
уменьшение массы, выраженное в процентах от исходного значения. Например, если исходная масса обозначается как  $m_o$ , а масса потерь-как  $\Delta m$ , тогда производительность обработки определяется по формуле  $P = \frac{\Delta m}{m_o} \times 100\%$ .

Значение  $\Delta m$  можно определить как разность массой исходной заготовки –  $m_0$  и массой заготовок после обработки –  $m_1$ . Производительность также можно оценить по изменение размера. Данный метод можно использовать лишь для заготовок правильной геометрической формы, например кубиков. Для этого измеряем их размеры кубика до и после обработки. Исходя из разности значениями размеров до и после обработки определяются величины съема в данной операции.

Барабанная галтовка производилась использованием галтовочного барабана показанной на рисунке 3.1. емкости 5 дм<sup>3</sup>. Вращение барабану 2 передается от электродвигателя 39 посредством ременной передачи и наборам шкивов. Регулирование частоты вращения электродвигателя осуществлялось от устройства регулирование частоты. Барабан 2 сменный и его можно заменить при выполнение операции. Например, при формообразовании кубиков с размерами ребра больше 40 мм в шаровидные заготовки использовали барабан с V-образными кольцевыми дорожками. При галтовке кубиков размерами менее 40 мм наиболее эффективным является использование барабана с гладкой рабочей поверхности. Установлено, что производительность обработки на галтовочном барабане определяется рядом факторов, в число которых: количество загрузки, соотношения объема загрузки и объема барабана, линейная скорость вращения барабана, количество абразива, соотношение твердой и жидкой составляющей загрузочной массы. Проведенные исследования позволили установить закономерности процесса обработки на данном станке.

Основной недостаток данного способа обработки, ограничивающий производительность обработки это прилипание заготовок к поверхности барабана под действием центробежных сил при повышенных частотах вращение барабана. Предложено новая конструкция барабана содержащие

скребок установленный на валу вращения барабана и устраняющий данный недостаток.



**Рис.3.1. Галтовочный барабан с горизонтальной осью вращения.**

Для измерения некруглости при черновых операциях использовали штангенциркуль. Некруглости при этом оценивается как разность наибольшего и наименьшего размера шаровидной заготовки. При чистовых операциях некруглость измеряли использованием оптикатора с ценой деления 1 мкм. Для измерения шероховатости обработанных поверхностей использовали профилограф-профилометр мод. 201.

### **3.2. Методика проведения эксперимента на многодисковом центробежно – абразивном станке**

Для проведения экспериментальных исследований разработан специальный станок на которой получен патент на изобретение. Сущность и принцип реализации данного способа приведено в главе 1 диссертации. При данном способе обработки одновременно работают несколько инструментов установленные внутри неподвижного барабана. Количество инструментов определяется поставленной задачи и ограничивается мощностью станка. В данном устройстве можно одновременно обработать материалы с различными физико-химическими свойствами, например самоцветные камни различной твердости.

Для этого устройство снабжено несколькими инструментами в виде абразивных дисков или алмазных планшайб. Абразивные диски установлены в вращающееся оси и расположены внутри барабана с цилиндрической внутренней поверхности. Оси вращения абразивных дисков и ось симметрии цилиндрической части барабана совпадают. Для расширения функциональных возможностей устройства применяется широкий набор инструментов. По необходимости можно установить инструмент с нужной зернистости и твердости абразивных зерен. Расстояние между инструментами выбирается исходя из размера наибольшего из обрабатываемых заготовок. Можно одновременно использовать инструменты, имеющие различную зернистость и, расположенные в порядке убывания зернистости снизу вверх.

Это дает возможность существенно повысить производительность обработки деталей, типа шариков из самоцветных камней, и производить одновременное выполнение операции формообразование, черновой и чистовой обработки.

Исследования процесса центробежной абразивной обработки шариков из самоцветных камней проводились на многоинструментальном центробежно абразивном станке. Схема станка приведено в главе 1, рис.1.5, на которой получено патент на изобретение. На данном станке можно одновременно

выполнять различные операции, таких как: формообразования, черновое шлифование, чистовое шлифование, отделочная обработка. Для этой цели используются абразивные инструменты в виде абразивных кругов или алмазных планшайб с различными характеристиками. При помощи данного станка можно выполнять только одну операцию, например, шлифование или несколько операций. Производительность при выполнении одной операции возрастает кратно количеству одновременно работающих инструментов.

Экспериментальные исследования, процесса обработки выполнение на данном станке направлены на выявление технологических возможностей способа «многодисковой центробежной галтовки», определение влияние режимов обработки на производительность и геометрическую форму изделий. Обработке подвергались образцы из самоцветных камней, таких как оникс, кальцит, лазурит, халцедон, аметист. При исследовании использовались алмазные круги различной зернистости, алмазные планшайбы, шлифовальные круги.

Производительность обработки оценивалось исходя из удельного массового съема материала. Массовый съем материала определялась как разностью массы образцов до и после обработки. Для взвешивания использовались весы АТ-400. Точность взвешивания составляло  $\pm 0,5\text{г}$ . Удельный массовый съем материала определялось как отношение массового съема материала к исходной массе в единицу времени. Для более точного определения значения удельного массового съема его значение определялось как среднее от взвешивания пяти партии обработанных заготовок.

Методика проведения экспериментальных исследований.

Для определения наиболее эффективного способа центробежной абразивной обработки определили производительность каждого из способов и сопоставлением результатов оценили методы по производительности. Для оценки производительности обработки использовали метод удельного массового съема материала описанной выше.

Величина массового съема материала  $\Delta m$  определялась разностью массы образцов до и после обработки. Определяя отношение величины массового

съема материала  $\Delta m$  измеренное в граммах к исходной массе в кг в единицу времени, можем объективно оценить производительности различных методов обработки. Единица измерения производительности при этом  $\frac{\text{г}}{\text{кг} \times \text{мин}}$ .

### **3.3. Методика метрологических исследований**

#### **3.3.1. Методика исследования минералогического состава самоцветных камней используемых в работе**

Для анализа химического состава камней применяется высокоточное современное оборудование, обеспечивающее надёжность спектральных данных и высокую скорость проведения измерений. Основу используемых методов составляют спектрометрические технологии, в числе которых оптическая и инфракрасная спектроскопия, высокочувствительные методы определения элементного состава, рентгенофлуоресцентный анализ, масс-спектрометрия, электронно-зондовый микроанализ и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия.

##### **Экспресс-анализатор «Инспектр» L365**

Компактный микроскоп, который отличается высокой точностью и скоростью работы. Может применяться для фотолюминесцентных спектров жидкостей, твердых образцов, порошков и гелеобразных субстанций. Преимущество этих моделей в том, что хотя это профессиональные устройства, пользоваться ими может даже человек без опыта. Используя данное оборудование геммологическое исследование можно проводить и вне лаборатории.

##### **Измерение формы деталей.**

Погрешность формы деталей это отклонение от заданной по чертежу формы. Например, для сферических деталей это отклонение от цилиндричности. В поперечном сечении эти погрешности выявляются в виде бочкообразности, седлообразности конусности или их сочетание. В продольном сечении возможно образование, некруглости в виде овальности, огранки. Для сферических тел правильной формы сечение проходящий через центр сферы образует круг. Когда это сечение имеет отклонение от круглости,

например эллипсность, овальность, граненость и т.д. по величине данного отклонения можно судить о погрешности формы сферической детали. Более наглядно и точно отклонение формы сферических деталей можно измерить при помощи проектора оптического профиля модели 400Н».

Этот прибор предназначен для контроля различных параметров деталей. В том числе можно с большой точностью определить линейные размеры (длина, ширина, высота, диаметр), угловые размеры, отклонение формы деталей (от окружности, не параллельности, неперпендикулярности, отклонение от линейности), определить профиль и шага резьбы. Точность измерения линейных размеров составляет 1мкм. Проектора оптического профиля «Optomech Profile Projector Model 400Н» имеет системы освещения и линз, для проецирования профилей измеряемых деталей. Для удобства измерений можно увеличить размеры детали в экране.

Система освещения состоит из, системы освещения профиля (диаскопическая система) и система освещения поверхности (эпикопическая система).

Система освещения профиля состоит из следующих элементов: источник света в виде галогенной лампы 24В/150Вт, регулятор яркости освещения и коллимирующей оптики. Достижения четкого профиля измеряемой детали на экране обеспечивается галогенной лампы, снабженной системами перемещения по направлениям OX, OY и OZ.

Для измерения линейных и угловых размеров используют экран профильного проектора, который имеет круговую шкалу на 360° и используются для измерение значения углов. При правильной настройке погрешность измерения не превышает 0,001мм. Для достижения правильных результатов рекомендуется провести не менее трех измерений. Значение измеряемого размера следует брать равной среднее значение от трех измерений.

Для измерения погрешности диаметра прецизионных деталей таких как золотников, плунжеров, шарики и ролики подшипников качения используют кругломеры. Наиболее широко используются кругломеры, модели "Talyronol", выпускаемый фирмой " Taylor Hobson ".

Использованием данного прибора на специальных дисках в полярных координатах записываются кругограммы. При использование данных кругломеров погрешности измерения не более 0,02мкм. Масштаб увеличения некруглости составляет от 50 до 1000. Определение погрешности поперечного сечения заготовок, записанной в полярных координатах, производится при помощи шаблона, имеющий концентрические окружности соответствующие различным масштабам увеличения от 50 до 1000.

Измерение погрешностей поперечного сечения, также можно выполнять использованием контрольных приборов типа оптиков различных типов. Цена деления данных приборов составляет 0,1-0,5мкм. Измерения изменения формы обработанных заготовок выполнялись использованием оптиков с ценой деления 0,5мкм. Для измерения на проекторе оптического профиля из каждой партии обрабатываемых заготовок выбрали по пять штук

Величина отклонения формы в поперечном сечении определялись сопоставлением результатов измерения заготовок до обработки и после их обработки.

Измерения шероховатости обработанных заготовок осуществлялись использованием профилометра модели 201.

### **3.3.2. Измерение некруглости**

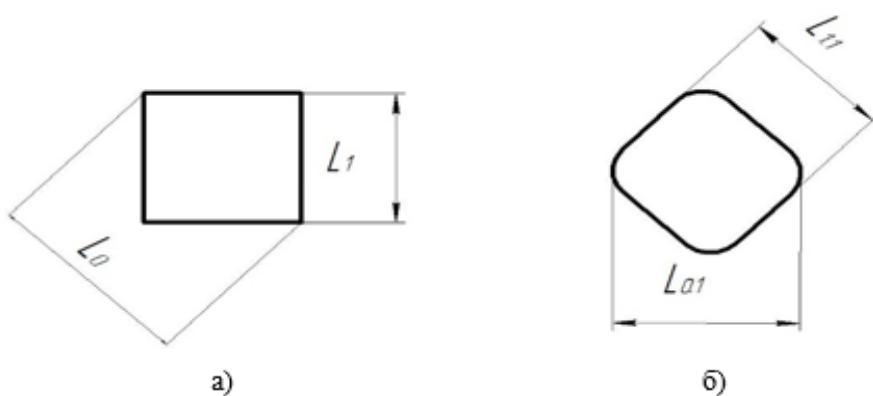
Для измерения некруглость заготовок формой тел вращения используются такие контрольные инструменты и приборы как: микрометры различного типа, специальные штангенциркули - кругломеры, оптиковы, проекторы оптического профиля. Точность измерения этими инструментами и приборами следующие: кругломеры-0,0001мм, проекторы оптического профиля-0,001мм, микрометры-0,01мм, штангенциркуль-0,1мм. При измерение после черновой обработке нами использованы штангенциркуль и микрометр, а при чистовой обработке профильный проектор «Optomech Profile Projector Model 400Н» (приложение 3, рисунок 5).

Этот прибор относится к прецизионным контрольно-измерительным приборам, обеспечивающий быстрый и качественный контроль обработанных заготовок.

При изготовление шариков из самоцветных камней исходные заготовки имеют форму кубиков. В другой операции угли и вершины куба притупляются, и им передается шаровидной формы. Производительность обработки оценивается по интенсивности съема материала заготовок. Для этого необходимо производить измерения размеров до и после обработки.

Для определения изменения формы заготовок в процессе обработки и погрешности отклонения от сферичности производим измерения до и после обработки. Отклонение формы определяется путем определения наибольших и наименьших размеров до и после обработки. На многоинструментальном центробежном станке на одной позиции обрабатывается партия заготовок. Для получения достоверных данных производили обработку партии заготовок не менее 50 штук. Далее определяем наименьшие и наибольшие размеры для каждого образца. На основе результатов эксперимента определяли наибольшие, наименьшие и средние размеры партии заготовок до и после обработки. Для объективной оценки и сравнения результатов обработки различных партий изменение формы в процентах относительно их исходной значений.

Исходной заготовкой при изготовление шаровидных изделий из самоцветных камней являются кубы соответствующих размеров. Размеры кубов не одинаковы. Разность между наибольшими и наименьшими размерами до обработки  $\delta_1 = L_0 - L_1$ , а после обработки  $\delta_2 = L_{01} - L_{11}$ . На рисунке 3.4. показаны измерения размеров до обработки (рис. 3.4.а) и после обработки (рис. 3.4.б).



**Рис.3.4 - а) Исходные размеры заготовки кубической формы,  
б) Заготовка после обработки.**

Изменение формы в результате обработки определяли по формуле:

$$\delta = (L_0 - L_1) - \frac{L_{01} - L_{1.1}}{L_0 - L_1} \times 100\%$$

или

$$\delta = (1 - L_1) - \frac{L_{01} - L_{1.1}}{L_0 - L_1} \times 100\%$$

Здесь  $L_0$  и  $L_1$  наибольший и наименьший размер заготовки до обработки.  $L_{10}$  и  $L_{1.1}$  соответственно наибольший и наименьший размеры заготовки после обработки. Пример исходных данных полученные из эксперимента приведены в таблицах 3.1 – 3.6.

Исходные данные, полученные из эксперимента

Таблица 3.1

Материал: Офит							
Обработка: Галтовка (без охлаждения)							
Экс №1							
№ п/п	A, мм	B, мм	C, мм	A, сред.	L, max	L, min	ΔL
1	10,89	10,66	11,52	11,02	18,85	10,66	8,19
2	11,91	11,48	10,82	11,40	19,50	10,82	8,68
3	11,74	11,21	10,49	11,15	19,06	10,49	8,57
4	11,35	10,64	11,43	11,14	19,05	10,64	8,41
5	11,42	11,27	10,77	11,15	19,07	10,77	8,30
6	11,34	10,25	11,45	11,01	18,83	10,25	8,58
7	11,76	10,22	10,88	10,95	18,73	10,22	8,51
8	10,61	9,88	12,86	11,12	19,01	9,88	9,13
9	10,28	10,66	10,88	10,61	18,14	10,66	7,48
10	12,21	9,85	11,71	11,26	19,25	9,85	9,40
11	10,96	9,78	10,94	10,56	18,06	9,78	8,28
12	11,37	10,68	12,23	11,43	19,54	10,68	8,86
13	12,49	9,75	11,54	11,26	19,25	9,75	9,50
14	11,64	11,01	10,49	11,05	18,89	10,49	8,40
15	10,97	10,41	11,04	10,81	18,48	10,41	8,07
16	12,01	11,13	10,95	11,36	19,43	10,95	8,48
17	11,16	9,69	11,01	10,62	18,16	9,69	8,47
18	11,22	10,27	11,33	10,94	18,71	10,27	8,44
19	10,99	9,82	11,18	10,66	18,23	9,82	8,41

Продолжение таблицы 3.1

20	11,85	9,97	11,46	11,09	18,97	9,97	9,00
21	12,75	10,75	10,89	11,46	19,60	10,75	8,85
22	12,76	9,68	11,08	11,17	19,11	9,68	9,43
23	12,04	11,03	10,00	11,02	18,85	10,00	8,85
24	11,12	10,93	11,75	11,27	19,27	10,93	8,34
25	11,52	10,92	11,23	11,22	19,19	10,92	8,27
26	12,12	10,66	11,22	11,33	19,38	10,66	8,72
27	11,97	11,11	10,31	11,13	19,03	10,31	8,72
28	10,84	11,66	11,09	11,20	19,15	10,84	8,31
29	11,44	9,75	10,87	10,69	18,27	9,75	8,52
30	11,58	10,23	11,74	11,18	19,12	10,23	8,89
31	11,49	10,21	12,61	11,44	19,56	10,21	9,35
32	12,84	10,48	11,45	11,59	19,82	10,48	9,34
33	13,12	10,25	10,97	11,45	19,57	10,25	9,32
34	12,58	9,77	11,48	11,28	19,28	9,77	9,51
35	11,19	9,46	11,46	10,70	18,30	9,46	8,84
36	11,80	10,48	11,68	11,32	19,36	10,48	8,88
37	11,47	9,66	10,90	10,68	18,26	9,66	8,60
38	11,70	10,87	10,70	11,09	18,96	10,70	8,26
39	14,45	9,73	11,30	11,83	20,22	9,73	10,49
40	11,77	10,52	10,99	11,09	18,97	10,52	8,45
41	12,44	10,46	10,59	11,16	19,09	10,46	8,63
42	11,56	10,64	11,18	11,13	19,03	10,64	8,39
43	12,41	11,27	10,21	11,30	19,32	10,21	9,11
44	12,08	10,89	10,70	11,22	19,19	10,70	8,49
45	11,49	11,03	10,39	10,97	18,76	10,39	8,37
46	13,10	10,82	11,46	11,79	20,17	10,82	9,35
47	12,93	10,94	11,07	11,65	19,92	10,94	8,98
48	12,13	10,16	11,46	11,25	19,24	10,16	9,08
49	11,53	11,08	10,85	11,15	19,07	10,85	8,22
50	11,89	9,86	11,13	10,96	18,74	9,86	8,88
Сред.	11,81	10,48	11,15	11,15	19,06	10,33	8,73

Исходные данные, полученные из эксперимента

Таблица 3.2

Материал: Офит							
Обработка: Галтовка							
Экс №2							
№ п/п	A, мм	B, мм	C, мм	A, сред.	L, max	L, min	ΔL
51	11,48	13,70	11,37	12,18	20,83	11,37	9,46
52	10,50	10,03	11,43	10,65	18,22	10,03	8,19
53	11,42	12,42	10,23	11,36	19,42	10,23	9,19
54	11,68	10,33	11,69	11,23	19,21	10,33	8,88
55	10,66	11,92	10,97	11,18	19,12	10,66	8,46
56	11,80	10,97	9,66	10,81	18,49	9,66	8,83
57	12,07	10,75	11,33	11,38	19,47	10,75	8,72
58	12,42	11,24	10,91	11,52	19,70	10,91	8,79
59	10,47	12,87	11,50	11,61	19,86	10,47	9,39
60	11,16	12,11	10,03	11,10	18,98	10,03	8,95
61	12,44	10,90	11,23	11,52	19,70	10,90	8,80
62	11,01	11,10	11,81	11,31	19,33	11,01	8,32
63	10,30	11,81	11,52	11,21	19,17	10,30	8,87
64	11,25	9,44	11,42	10,70	18,30	9,44	8,86
65	11,25	9,81	10,25	10,44	17,85	9,81	8,04
66	9,88	11,84	11,44	11,05	18,90	9,88	9,02
67	9,91	11,05	12,20	11,05	18,90	9,91	8,99
68	10,18	11,31	11,74	11,08	18,94	10,18	8,76
69	10,47	10,94	12,49	11,30	19,32	10,47	8,85
70	10,06	12,05	10,16	10,76	18,39	10,06	8,33
71	10,98	12,00	9,67	10,88	18,61	9,67	8,94
72	12,28	11,44	10,75	11,49	19,65	10,75	8,90
73	11,53	10,74	11,25	11,17	19,11	10,74	8,37
74	10,77	11,16	11,34	11,09	18,96	10,77	8,19
75	13,03	10,28	9,09	10,80	18,47	10,28	8,19
76	9,94	12,19	10,85	10,99	18,80	9,94	8,86
77	11,12	11,05	10,29	10,82	18,50	10,29	8,21
78	10,78	10,11	12,29	11,06	18,91	10,11	8,80
79	11,38	11,40	10,33	11,04	18,87	10,33	8,54
80	10,11	10,12	11,57	10,60	18,13	10,11	8,02
81	10,24	12,24	11,25	11,24	19,23	10,24	8,99

Продолжение таблицы 3.2

82	10,73	11,62	11,36	11,24	19,21	10,73	8,48
83	11,27	9,62	12,02	10,97	18,76	9,62	9,14
84	10,47	12,74	12,09	11,77	20,12	10,47	9,65
85	10,56	11,00	11,75	11,10	18,99	10,56	8,43
86	8,93	12,44	10,89	10,75	18,39	8,93	9,46
87	10,91	9,18	10,97	10,35	17,70	9,18	8,52
88	10,07	12,08	11,87	11,34	19,39	10,07	9,32
89	10,06	12,34	11,26	11,22	19,19	10,06	9,13
90	8,92	11,02	11,50	10,48	17,92	8,92	9,00
91	10,27	11,90	10,53	10,90	18,64	10,27	8,37
92	12,47	10,02	11,37	11,29	19,30	10,02	9,28
93	11,72	10,08	10,87	10,89	18,62	10,08	8,54
94	11,07	12,56	10,96	11,53	19,72	10,96	8,76
95	10,32	10,96	12,54	11,27	19,28	10,32	8,96
96	9,97	11,29	11,81	11,02	18,85	9,97	8,88
97	10,87	13,94	9,63	11,48	19,63	9,63	10,00
98	11,10	10,92	10,40	10,81	18,48	10,40	8,08
99	9,24	12,59	12,67	11,50	19,67	9,24	10,43
100	10,47	10,80	11,13	10,80	18,47	10,47	8,00
Сред.	10,84	11,33	11,15	11,11	18,99	10,19	8,80

Исходные данные, полученные из эксперимента

Таблица 3.3

Материал: Лазурит							
Обработка: Галтовка (без охлаждения)							
Экс №3							
№ п/п	A, мм	B, мм	C, мм	A, сред.	L, max	L, min	ΔL
1	11,13	11,65	10,90	11,23	19,20	10,90	8,30
2	11,05	11,42	11,65	11,37	19,45	11,05	8,40
3	11,66	11,83	11,33	11,61	19,85	11,33	8,52
4	11,59	11,56	10,56	11,24	19,21	10,56	8,65
5	11,95	11,46	11,57	11,66	19,94	11,46	8,48
6	11,20	11,23	11,40	11,28	19,28	11,20	8,08
7	12,04	11,96	11,04	11,68	19,97	11,04	8,93
8	11,63	11,19	11,61	11,48	19,63	11,19	8,44
9	11,45	11,62	10,53	11,20	19,15	10,53	8,62
10	11,79	11,02	10,54	11,12	19,01	10,54	8,47

Продолжение таблицы 3.3

11	11,88	11,29	11,17	11,45	19,57	11,17	8,40
12	11,77	11,29	11,19	11,42	19,52	11,19	8,33
13	11,10	11,52	10,68	11,10	18,98	10,68	8,30
14	11,81	11,54	10,70	11,35	19,41	10,70	8,71
15	10,81	11,01	11,19	11,00	18,82	10,81	8,01
16	11,56	11,36	11,78	11,57	19,78	11,36	8,42
17	11,13	10,87	11,44	11,15	19,06	10,87	8,19
18	11,50	10,95	10,36	10,94	18,70	10,36	8,34
19	11,32	10,90	10,66	10,96	18,74	10,66	8,08
20	11,29	11,88	10,70	11,29	19,31	10,70	8,61
21	10,42	10,91	11,14	10,82	18,51	10,91	7,60
22	11,54	11,40	10,90	11,28	19,29	10,90	8,39
23	11,23	10,95	11,76	11,31	19,35	10,95	8,40
24	11,33	11,42	10,30	11,02	18,84	10,30	8,54
25	11,46	11,53	10,47	11,15	19,07	10,47	8,60
26	11,12	11,38	10,72	11,07	18,94	10,72	8,22
27	11,38	11,11	12,82	11,77	20,13	11,11	9,02
28	12,18	12,02	12,20	12,13	20,75	12,02	8,73
29	10,93	11,91	11,37	11,40	19,50	10,93	8,57
30	11,18	11,43	11,92	11,51	19,68	11,18	8,50
31	11,27	11,66	10,74	11,22	19,19	1,74	17,45
32	11,78	10,64	11,16	11,19	19,14	10,64	8,50
33	12,05	11,01	12,06	11,71	20,02	11,01	9,01
34	11,91	11,12	10,57	11,20	19,15	10,57	8,58
35	12,30	11,22	11,62	11,71	20,03	11,22	8,81
36	11,09	11,50	11,27	11,29	19,30	11,09	8,21
37	11,53	11,22	10,62	11,12	19,02	10,62	8,40
38	12,14	11,05	12,47	11,89	20,33	11,05	9,28
39	10,54	10,56	11,25	10,78	18,44	10,54	7,90
40	11,36	11,26	11,02	11,21	19,17	11,02	8,15
41	11,78	11,71	11,29	11,59	19,82	11,29	8,53
42	11,39	11,29	12,29	11,66	19,93	11,29	8,64
43	11,18	11,38	10,71	11,09	18,96	10,71	8,25
44	11,39	11,17	10,78	11,11	19,00	10,78	8,22
45	10,85	11,17	11,88	11,30	19,32	10,85	8,47
46	11,29	12,57	11,56	11,81	20,19	11,29	8,90
47	10,51	11,42	11,80	11,24	19,23	10,51	8,72
48	10,89	11,59	11,94	11,47	19,62	10,89	8,73
49	11,02	10,91	11,34	11,09	18,96	10,91	8,05
50	11,27	12,00	10,55	11,27	19,28	10,55	8,73
Сред.	11,40	11,36	11,23	11,33	19,37	10,73	8,65

Исходные данные, полученные из эксперимента

Таблица 3.4

Материал: Лазурит							
Обработка: Галтовка							
Экс №4							
№ п/п	A, мм	B, мм	C, мм	A, сред.	L, max	L, min	ΔL
51	11,22	11,32	10,71	11,08	18,95	10,71	8,24
52	12,08	11,50	10,59	11,39	19,48	10,59	8,89
53	11,12	11,57	10,73	11,14	19,05	10,73	8,32
54	11,11	11,26	11,17	11,18	19,12	11,11	8,01
55	11,36	12,00	11,21	11,52	19,70	11,21	8,49
56	11,05	11,38	10,65	11,03	18,86	10,65	8,21
57	11,62	11,42	10,84	11,29	19,31	10,84	8,47
58	11,58	11,27	10,58	11,14	19,06	10,58	8,48
59	12,00	11,80	10,92	11,57	19,79	10,92	8,87
60	11,66	11,96	11,51	11,71	20,02	11,51	8,51
61	10,98	10,99	11,16	11,04	18,88	10,98	7,90
62	11,60	11,17	10,74	11,17	19,10	10,74	8,36
63	11,73	11,39	11,35	11,49	19,65	11,35	8,30
64	10,95	11,80	11,08	11,28	19,28	10,95	8,33
65	11,10	11,26	11,67	11,34	19,40	11,10	8,30
66	12,13	12,20	10,40	11,58	19,80	10,40	9,40
67	10,98	12,24	11,31	11,51	19,68	10,98	8,70
68	11,63	11,37	10,91	11,30	19,33	10,91	8,42
69	11,22	11,07	11,26	11,18	19,12	11,07	8,05
70	11,52	11,43	11,44	11,46	19,60	11,43	8,17
71	11,87	11,67	11,82	11,79	20,16	11,67	8,49
72	12,07	10,87	11,50	11,48	19,63	10,87	8,76
73	11,61	12,34	11,11	11,69	19,98	11,11	8,87
74	10,68	11,46	11,66	11,27	19,27	10,68	8,59
75	11,69	11,74	11,67	11,70	20,01	11,69	8,32
76	11,53	10,56	11,29	11,13	19,03	10,56	8,47
77	11,64	10,83	11,16	11,21	19,17	10,83	8,34
78	11,30	10,90	11,91	11,37	19,44	10,90	8,54
79	11,04	11,45	11,22	11,24	19,21	11,04	8,17
80	11,88	11,76	11,15	11,60	19,83	11,15	8,68
81	11,32	11,85	11,25	11,47	19,62	11,25	8,37
82	11,46	11,78	11,64	11,63	19,88	11,46	8,42
83	11,54	11,02	11,24	11,27	19,27	11,02	8,25

Продолжение таблицы 3.4

84	10,78	11,40	11,67	11,28	19,29	10,78	8,51
85	10,97	11,14	11,98	11,36	19,43	10,97	8,46
86	11,52	11,59	11,58	11,56	19,77	11,52	8,25
87	11,26	11,39	11,04	11,23	19,20	11,04	8,16
88	10,81	11,25	11,06	11,04	18,88	10,81	8,07
89	11,37	11,98	10,66	11,34	19,39	10,66	8,73
90	11,31	11,14	11,53	11,33	19,37	11,14	8,23
91	11,77	11,84	11,28	11,63	19,89	11,28	8,61
92	11,37	11,23	11,30	11,30	19,32	11,23	8,09
93	11,31	11,71	11,38	11,47	19,61	11,31	8,30
94	11,79	11,76	11,64	11,73	20,06	11,64	8,42
95	11,63	11,27	10,60	11,17	19,10	10,60	8,50
96	11,99	11,68	11,47	11,71	20,03	11,47	8,56
97	11,44	11,97	10,84	11,42	19,52	10,84	8,68
98	11,64	11,72	11,25	11,54	19,73	11,25	8,48
99	12,41	11,33	10,94	11,56	19,77	10,94	8,83
100	11,50	12,46	11,80	11,92	20,38	11,50	8,88
Сред.	11,46	11,51	11,22	11,40	19,49	11,04	8,45

Исходные данные, полученные из эксперимента

Таблица 3.5

Материал: Аметист							
Обработка: Галтовка (без охлаждения)							
Экс №5							
№ п/п	A, мм	B, мм	C, мм	A, сред.	L, max	L, min	ΔL
1	10,55	12,07	11,35	11,32	19,36	10,55	8,81
2	13,49	11,48	11,14	12,04	20,58	11,14	9,44
3	11,68	11,60	9,90	11,06	18,91	9,90	9,01
4	10,76	12,93	11,54	11,74	20,08	10,76	9,32
5	12,35	11,38	10,48	11,40	19,50	10,48	9,02
6	11,06	9,95	12,04	11,02	18,84	9,95	8,89
7	12,82	10,63	10,91	11,45	19,59	10,63	8,96
8	11,66	11,85	10,92	11,48	19,63	10,92	8,71
9	12,15	11,33	10,11	11,20	19,15	10,11	9,04
10	10,21	11,31	13,09	11,54	19,73	10,21	9,52
11	11,70	11,33	10,06	11,03	18,86	10,06	8,80
12	10,69	11,58	11,54	11,27	19,27	10,69	8,58

Продолжение таблицы 3.5

13	11,52	10,88	11,74	11,38	19,46	10,88	8,58
14	11,66	10,84	11,55	11,35	19,41	10,84	8,57
15	12,29	10,82	12,17	11,76	20,11	10,82	9,29
16	12,57	11,36	13,61	12,51	21,40	11,36	10,04
17	11,04	11,07	11,23	11,11	19,00	11,04	7,96
18	10,95	12,53	10,05	11,18	19,11	10,05	9,06
19	10,70	11,99	10,09	10,93	18,68	10,70	7,98
20	10,54	11,39	11,28	11,07	18,93	10,54	8,39
21	11,87	9,89	11,59	11,12	19,01	9,89	9,12
22	11,03	10,60	11,42	11,02	18,84	10,60	8,24
23	11,90	10,49	11,23	11,21	19,16	10,46	8,70
24	11,61	11,03	11,85	11,50	19,66	11,03	8,63
25	11,34	11,49	12,45	11,76	20,11	11,34	8,77
26	11,40	11,08	10,91	11,13	19,03	10,91	8,12
27	12,52	11,57	10,23	11,44	19,56	10,23	9,33
28	11,93	12,40	10,99	11,77	20,13	10,99	9,14
29	11,10	12,01	10,68	11,26	19,26	10,68	8,58
30	11,51	11,04	10,99	11,18	19,12	10,99	8,13
31	11,43	12,40	10,50	11,44	19,57	10,50	9,07
32	11,12	11,53	11,25	11,30	19,32	11,12	8,20
33	10,49	12,84	11,31	11,55	19,74	10,49	9,25
34	10,75	11,83	10,90	11,16	19,08	10,75	8,33
35	11,71	11,74	11,84	11,76	20,12	11,71	8,41
36	10,48	11,99	13,71	12,06	20,62	10,48	10,14
37	11,82	10,79	10,69	11,10	18,98	10,69	8,29
38	11,84	11,56	10,95	11,45	19,58	10,95	8,63
39	12,17	10,99	11,55	11,57	19,78	10,99	8,79
40	12,40	10,93	10,84	11,39	19,48	10,84	8,64
41	10,15	11,70	11,80	11,22	19,18	10,15	9,03
42	11,83	11,65	12,40	11,96	20,45	11,65	8,80
43	11,19	11,70	11,13	11,34	19,39	11,13	8,26
44	11,84	11,31	10,27	11,14	19,05	10,27	8,78
45	10,40	10,99	11,56	10,98	18,78	10,40	8,38
46	10,32	11,97	12,09	11,46	19,60	10,32	9,28
47	11,09	9,50	11,20	10,60	18,12	9,50	8,62
48	11,83	12,60	10,84	11,76	20,10	10,84	9,26
49	11,96	11,01	11,81	11,59	19,82	11,01	8,81
50	12,70	11,41	10,25	11,45	19,59	10,25	9,34
Сред.	11,48	11,41	11,28	11,39	19,48	10,66	8,82

Исходные данные, полученные из эксперимента

Таблица 3.6

Материал: Аметист							
Обработка: Галтовка							
Экс №6							
№ п/п	A, мм	B, мм	C, мм	A,сред.	L, max	L, min	ΔL
51	10,51	12,34	11,37	11,41	19,51	10,51	9,00
52	10,56	12,11	11,33	11,33	19,38	10,56	8,82
53	11,55	10,81	11,64	11,33	19,38	10,81	8,57
54	10,03	11,47	11,77	11,09	18,96	10,03	8,93
55	11,22	11,59	11,92	11,58	19,80	11,22	8,58
56	10,83	12,13	11,79	11,58	19,81	10,83	8,98
57	11,60	10,81	11,38	11,26	19,26	10,81	8,45
58	11,32	11,46	11,33	11,37	19,44	11,32	8,12
59	11,24	11,24	11,25	11,24	19,23	11,24	7,99
60	11,83	11,42	11,38	11,54	19,74	11,38	8,36
61	11,55	11,25	11,77	11,52	19,70	11,25	8,45
62	9,93	12,26	11,12	11,10	18,99	9,93	9,06
63	12,22	10,49	11,25	11,32	19,36	10,49	8,87
64	12,61	11,22	10,85	11,56	19,77	10,85	8,92
65	12,85	10,28	11,68	11,60	19,84	10,28	9,56
66	12,85	11,05	11,29	11,73	20,06	11,05	9,01
67	11,50	11,12	10,66	11,09	18,97	10,66	8,31
68	10,16	11,20	11,49	10,95	18,72	10,16	8,56
69	10,99	11,56	12,48	11,68	19,97	10,99	8,98
70	11,32	12,77	10,99	11,69	20,00	10,99	9,01
71	12,24	11,13	11,59	11,65	19,93	11,13	8,80
72	12,28	11,34	11,52	11,71	20,03	11,34	8,69
73	12,20	11,05	10,01	11,09	18,96	10,01	8,95
74	9,97	12,28	10,60	10,95	18,72	9,97	8,75
75	10,33	12,27	12,06	11,55	19,76	10,33	9,43
76	11,26	12,65	9,93	11,28	19,29	9,93	9,36
77	11,29	11,43	11,41	11,38	19,45	11,29	8,16
78	12,57	11,35	10,76	11,56	19,77	10,76	9,01
79	10,61	11,82	11,49	11,31	19,33	10,61	8,72
80	11,84	12,58	12,00	12,14	20,76	11,84	8,92
81	10,91	11,18	12,28	11,46	19,59	10,91	8,68
82	9,91	11,60	11,11	10,87	18,59	9,91	8,68
83	11,65	9,95	11,34	10,98	18,78	9,95	8,83

Продолжение таблицы 3.6

84	11,01	11,36	11,65	11,34	19,39	11,01	8,38
85	12,69	10,16	12,83	11,89	20,34	10,16	10,18
86	11,26	11,10	10,43	10,93	18,69	10,43	8,26
87	12,35	11,79	10,63	11,59	19,82	10,63	9,19
88	10,97	11,29	11,83	11,36	19,43	10,97	8,46
89	11,87	12,21	11,03	11,70	20,01	11,03	8,98
90	12,41	10,83	11,95	11,73	20,06	10,83	9,23
91	10,80	12,03	12,20	11,68	19,97	10,80	9,17
92	10,08	11,20	11,58	10,95	18,73	10,08	8,65
93	12,20	11,27	11,02	11,50	19,66	11,02	8,64
94	11,11	12,30	11,61	11,67	19,96	11,11	8,85
95	12,33	11,36	11,38	11,69	19,99	11,36	8,63
96	11,28	12,32	10,41	11,34	19,39	10,41	8,98
97	10,45	13,38	11,99	11,94	20,42	10,45	9,97
98	11,16	11,44	10,28	10,96	18,74	10,28	8,46
99	11,26	11,99	10,49	11,25	19,23	10,49	8,74
100	11,20	10,32	11,67	11,06	18,92	10,32	8,60
Сред.	11,36	11,51	11,36	11,41	19,51	10,69	8,82

Производительность обработки зависит от применяемого оборудования и способа обработки. Существуют, множество технологических процессов и оборудования для формообразования заготовок кубической в шарики. Анализ результатов эксперимента по формообразование шариков различными способами показало, способы центробежной абразивной обработки являются более производительными по сравнение других способов. Существуют различные способы центробежной обработки, которых можно использовать для формообразования заготовок кубической формы в шарики. К этим способам относятся: планетарно-центробежные, центробежные с вращающимся дном, многоинструментальные центробежные, центробежные с направляющими пластинами и др.

### 3.3.3. Измерение шероховатости поверхности

Качество изделий из полудрагоценных и поделочных камней о многом зависит от параметров шероховатости, образуемые при обработке. Изделия

после обработки должны быть гладкими с характерным блеском. Гладкость поверхности и его блеск зависят от параметров шероховатости, образуемые при обработке. Оценка параметров шероховатости может осуществляться различными способами, одним из которых является:

- 1) визуально-сравнительный метод заключается в сравнении исследуемой поверхности с контрольными образцами, имеющими заранее установленную шероховатость;
- 2) ощупыванием специальным прибором с алмазной насадкой, его также именуют как контактный метод;
- 3) измерение шероховатости оптическими приборами, или бесконтактный метод.

Измерения параметров шероховатости обработанных образцов использовалось профилограф - профилометр мод. 201 "Калибр", действие которого основано на принципе ощупывания поверхности алмазной иглой. Основные части профилографа-профилометра следующие: измерительное устройство, электронный блок, самозаписывающее устройство, показывающие приборы. В корпусе прибора установлен универсальный стол, который позволяет перемещать проверяемую деталь в плоскости по двум координатам и осуществлять поворот.

Снятием профилограммы с поверхности детали и его дальнейшей обработкой определяются параметры шероховатость обработанной поверхности. Длина участка, где снимается профилограмма различно для разных шероховатостей. Данная длина именуется как базовой длины и установлено ГОСТ-ом 2789-73. Из шести параметров шероховатости поверхности установленный ГОСТ-ом 2789-73 для самоцветных камней главными являются  $R_a$  и  $R_z$ , так как от значения этих параметров зависят декоративные свойства обработанных поверхностей. Значение параметра  $R_a$  определяется по формуле 3.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y_i| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad (3.1)$$

В данной формуле Y- абсолютные значения отклонений профиля от средней линии; n-количество точек измерения профиля в пределах базовой длины. Параметр Rz (высота неровностей профиля по десяти точкам, формула 3) определяется как сумма высот пяти наибольших выступов и пяти самых глубоких впадин, измеренных от средней линии профиля.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |Y_{bi}| + \sum_{i=1}^5 |Y_{hi}|}{5} \quad (3.2)$$

Достоверности результатов измерения параметров шероховатости образцов оценивались по методике, приведенной в работе [15].

$$n_y = \frac{z^2 \times R_R}{3 \times \tilde{\Delta}^2} \quad (3.3)$$

в данной формуле Z -аргумент функции Лапласа, который определяется по справочной таблице [16], исходя из следующей отношения (формула 3.4)

$$\Phi_0 = \alpha/2 \quad (3.4)$$

В данной формуле  $\alpha$  - степень достоверности результатов (значение  $\alpha = 0,95$ ), тогда  $\Phi_0 = 0,475$ ,  $Z = 1,96$ .

$R_R$  – размах варьирования.

$\tilde{\Delta}$  – допустимая величина погрешности значения параметра шероховатости поверхности образцов. Для рассматриваемого случаю можно записать:

$$n_y = 1,28 \times \frac{R_R}{\tilde{\Delta}} \quad (3.5)$$

### 3.4. Методика проведения экспериментов и обработка экспериментальных данных

Для выявления и оценки закономерностей процесса многоинструментальной центробежной абразивной обработки проведены однофакторные и многофакторные эксперименты. Проведением однофакторных экспериментов и их влиянием на параметры процесса обработки установлено, что основные факторы режима обработки сильно влияющие на параметры производительности и точности обработки в данном случае следующие: частота вращения инструмента определяющей его

линейную скорость, продолжительность обработки и зернистость абразива (среднее значения величины зерен абразива). Данная работа выполнялось в следующем порядке:

1. По результатам проведенных однофакторных экспериментов установлены факторы, оказывающие наибольшее влияния на точностью формы, производительности, качеством поверхности;
2. Проведены ранжирование факторов их по степени влияния на параметры процесса;
3. Установление интервалы варьирования факторов;
4. Составлены матрицы планирования проведение многофакторного эксперимента;
5. Проведен анализ результатов экспериментальных исследований и построены математические модели процесса многоинструментальной центробежной абразивной обработки.

На процесс обработки, наиболее сильно влияют следующие параметры:

$\vartheta$  - линейная скорость инструмента, выраженные в м/мин;

$n_z$  – количество абразива, подаваемого в зону обработки, в граммах на килограмм массы заготовок;

$t$  – продолжительность обработки в минутах.

Эксперименты выполнялись по методике полного факторного планирования, при котором каждый фактор варьировался на двух уровнях. Количество опытов определялось в соответствии с принципами рационального экспериментального планирования [96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104].

Применение метода полного факторного эксперимента позволила построить полноценную математическую модель процесс, учитывающую не только основные эффекты, но и взаимодействие факторов.

В плане эксперимента верхние и нижние границы интервалы факторов, обозначены +1 и -1. Эти планы, где факторы рассматриваются на двух уровнях называют планами  $2^k$ , здесь  $k$  - число факторов.

Число экспериментальных точек зависят от числа факторов и определяется по формуле  $N = 2^k$ . Если количество факторов  $k = 3$ , уравнение математической модели можно записать в следующем виде:

$$\tilde{Y} = b_0 + b_1 \times X_1 + b_2 \times X_2 + b_3 \times X_3 + b_{1.2}X_1 \times X_2 + b_{1.3}X_1 \times X_3 + b_{2.3}X_2 \times X_3 + b_{1.2.3}X_1 \times X_2 \times X_3 \quad (3.6)$$

Для определения коэффициентов  $b_i$  уравнение регрессии используются данные, полученные из эксперимента. Для построения модели процесса обработки методом полного факторного эксперимента необходимо:

- а) разработать матрицу планирования и выполнить эксперименты в предусмотренных точках;
- б) провести проверку статистической значимости коэффициентов уравнения математической модели;
- в) проверка его адекватности уравнения математической модели процесса обработки.

### **3.4.1. Методика обработки экспериментальных данных**

Для обработки результатов эксперимента и получения уравнения математической модели нами использованы методы наименьших квадратов и равных сумм [76, 77]. По характерным точкам графика зависимости параметра процесса обработки от исследуемого параметра определяем вид кривой наиболее соответствующий данному случаю и вид уравнение которой заранее известно. По значениям полученные при эксперименте  $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_n$ , и соответствующим им расчетные значения,  $f(x_1), f(x_2), f(x_3), K, f(x_n)$ , то  $S = \sum_{k=1}^n [Y_k - f(x_k)]^2$  определяем коэффициенты уравнения. По результатам экспериментальных исследований построив график зависимости исследуемого фактора от параметра процесса подберём уравнение  $Y_s = F \times (x, a, b, c, d \dots)$  наиболее соответствующей полученной расположение точек. Коэффициенты  $a, b, c, d$ , определяются исходя из условии обеспечения минимального значения интеграла несоответствия между истиной и расчетной значений функции в заданном интервале варьирования.

Данный интеграл обозначаем как  $E$ . Его значение можно определить по формуле 3.7.

$$E = \int_b^a (y - y_0) \cdot d_x = E(a, b, c, d, \dots) \quad (3.7)$$

Наиболее точной соответствия расчетных значений с экспериментальными данными, выполняется при условие:

$$E = (a, b, c, d, \dots) = E_{\min} \quad (3.8)$$

Частные производные переменных  $a, b, c, d$   $\frac{\partial \varepsilon}{\partial a}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial b}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial c}, \dots$ , приравниваем нулю и рассматриваем величину  $E$  как функцию данных переменных (формула 3.9):

$$\begin{aligned} \int_b^a (Y - Y_0) \times \frac{\partial \times y_0}{\partial a} \times d_x &= 0, \\ \int_b^a (Y - Y_0) \times \frac{\partial \times y_0}{\partial b} \times d_x &= 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Из полученной системы уравнений определяем значения коэффициентов функции.

### 3.4.2. Статистическая обработка экспериментальных данных

Случайные величины могут подчиняться различным законам. Например, закону Гаусса (закон нормального распределения), закону Симпсона (закон равнобедренного треугольника), закону эксцентрикитета, закону равной вероятности и тд. При механической обработке чаще имеет место закон Гаусс. Статистическую обработку результатов экспериментов проводили считая, что их распределения соответствует закону Гаусса. Если распределения случайной величины не соответствует данному закону, то можно предположить, что на распространения отклонений в данном случае оказывают влияние неучтенные факторы.

Проверку адекватности модели выполняем при помощи критерии Фишера [71].

$$F = \frac{S_{\theta\partial}^2}{S_y^2} \quad (3.10)$$

В данной формуле  $F$ - критерия Фишера;  $S_{\theta\partial}^2$  - дисперсия адекватности модели;  $S_y^2$  - дисперсия, характеризующая опыты.

Математический модель адекватно в том случае, когда значение критерии Фишера меньше соответствующие табличные значения. При решении большинство инженерных задач уровням значений, берется равным 0,05 - (5%).

Проверка значимости коэффициентов математической модели производим по  $t$  – критерии или так называемый критерии Стьюдента. Проверка значимости по критерии Стьюдента производим в следующем порядке. Сперва необходимо определить значение дисперсии коэффициента регрессии  $\{s^2 b_i\}$ . Для получения достоверных результатов обычно каждый эксперимент, повторяют минимум три раза и среднее значение от трех измерений принимают в качестве результата в данной точке плана. Если количество повторных опытов одинаково во всех точках эксперимента значение  $S_v^2$ . можно определить по формуле:

$$S_v^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{vi} - \bar{y}_v)^2}{r-1} \quad (3.11)$$

В формуле 3.11  $r$  — число повторных опытов в точках плана.

Значение дисперсия параметра оптимизации  $s^2(y)$  определяется как средней арифметической из дисперсий всех различных вариантов опытов. Дисперсию параметра оптимизации можно определить по формуле 3.12.

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{v=1}^n s_v^2}{n} = \frac{\sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^r (y_{vi} - \bar{y}_v)^2}{n(r-1)} \quad (3.12)$$

Данная формула применяется, если число повторных опытов одинаково во всех точках плана.

Когда число повторных опытов не одинаково во всех экспериментальных точках дисперсия параметра оптимизации определяется по формуле 3.13.

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{v=1}^n f_v s_v^2}{\sum_{v=1}^n f_v} = \frac{\sum_{v=1}^n f_v s_v^2}{f_E} \quad (3.13)$$

В приведенной формуле,  $S_v^2$  - значение дисперсии параметра оптимизации по строкам плана;  $r_v$  - число повторных опытов;  $f_v = r_v - 1$  число степеней свободы по строкам;  $f_E$  - число степеней свободы параметра  $s^2\{y\}$ . Значение дисперсии параметра оптимизации-  $s^2\{y\}$  определяется как сумме дисперсии по строкам.

Однородность дисперсии определяется по таким критериям как: критерии Кохрена, критерии Фишера, критерии Бартлетта. Критерию Кохрена используют, когда во всех количестве повторных опытов одинаково во всех точках плана. Для проверки однородности дисперсии по данной критерии необходимо определить наибольшую дисперсию  $S_{max}$  и его соотношение к сумме всех дисперсий по точкам.

Регрессионный анализ. Для определения коэффициентов в уравнение математической модели однофакторных экспериментов используем метод наименьших квадратов.

После определения значения коэффициентов модели следует проверить их статистическую значимость. Для правильной оценки статистической значимости коэффициентов необходимо, что:

1. Дисперсия параметра оптимизации было одинаково в разных точках плана.
2. Параметры оптимизации в всех точках факторного пространства являлись независимыми и нормально распределенными случайными величинами.
3. Ошибки измерения значения факторов должны быть меньше ошибки их воспроизводимости.

Анализ значимости коэффициентов модели. Значимости коэффициентов модели определяют использованием Стьюдента. Для этого сперва определяют величину дисперсию коэффициента модели  $s^2\{b_i\}$ . Когда повторные опыты  $r$  одинаковы по всем очкам эксперимента, значение коэффициента регрессии можно определить по следующей формуле:

$$S^2\{b_i\} = \frac{s^2\{y\}}{nr} \quad (3.14)$$

В данной формуле  $f_E = n(r - 1)$  степени свободы.

Значения критерии Стьюдента рассчитаем по формуле:

$$t_i = \frac{|b_i|}{s\{b_i\}} \quad (3.15)$$

Критическое значение критерии Стьюдента- $t_{kp}$  определяется по таблице [66]. В нашем случае количество экспериментов-  $n$  равно восьми и число повторных опытов-  $r$  равно трем. Тогда значение степени свободы  $n(r - 1) = 16$ . Принимаем уровень значимости- $\alpha$  равной 5%, тогда критическое значение критерии Стьюдента- $t_{kp} = 1,74$ . Если расчетное значение критери Стьюдента- $t_i$  больше  $t_{kp}$ , коэффициент  $b_i$  считается значимым. При невыполнение данного условия коэффициент  $b_i$  считается статистически незначимым и его можно приравнивать нулю.

**Проверка адекватности модели.** Для оценки адекватности модели необходимо оценить разницу, расчетное значение параметра по уравнение модели и фактического его значения из результатов эксперимента в различных точках плана.

Это условие можно записать посредством дисперсии адекватности, по формуле 3.16.

$$S_{ad}^2 = \frac{r}{n-1} \times \sum_{v=1}^n (\bar{y}_v - \hat{y})^2 \quad (3.16)$$

Дисперсия адекватности- $S_{ad}^2$  оценивается в соответствие с числом степеней свободы  $f_{ad} = n-m$ , где  $m$  - число членов уравнение математической модели.

На основе соотношение дисперсии адекватности  $s_{ad}^2$  и дисперсии воспроизводимости- $s^2\{y\}$  определяется адекватности модели.

Число степеней свободы, определяется как разность между количеством опытов и количеством коэффициентов принятой математической модели.

Когда расчетное значение критерия Фишера меньше критического  $F_{kp}$ , для имеющей место степени свободы  $f_{ad} = n-m$ , при,  $f_E = n(r-1)$  и уровень значимости -  $\alpha\%$ , то модель считается адекватным [67]. Если данное условие не выполняется математическая модель считается неадекватным процессу.

Оценку адекватности в данном случае можно производить по формуле 3.17 [78].

$$s_{ad}^2 = \frac{r}{n-1} \sum_{v=1}^n (\bar{y}_v - \hat{y})^2 \quad (3.17)$$

Модель адекватна, если  $s_{ad}^2 < s^2 \{ y \}$

### 3.5. Заключение к главе III

1. В данной главе рассмотрены вопросы методика проведения экспериментальных исследований, оборудования и инструменты применяемой при обработке, контроль качества изделия.

2. Оборудования, используемые при исследованиях процесса изготовления изделий следующие: многоинструментальный центробежно-абразивный станок, планетарно-центробежный станок, центробежный станок с направляющими пластинами.

3. В качестве инструментов использовались стандартные абразивные круги, алмазные планшайбы, алмазные отрезные круги, также свободный абразив.

4. Производительность процесса обработки определялся сравнением массы заготовки до и после обработки и оценивается по уменьшение массы заготовок по сравнение с исходной массой в процентах. Когда исходная масса  $m_0$ , а потери массы равно  $\Delta m$ , тогда производительность можно определить как  $\frac{\Delta m}{m_0} \cdot 100\%$ . Значение  $\Delta m$  можно определить как разность массой исходной заготовки-  $m_0$  и массой заготовок после обработки-  $m_1$ .

5. Отклонении формы и размера выполнены использованием проектора оптического профиля модели 400Н с помощью которого можно с большой точностью определить линейные размеры (длина, ширина, высота, диаметр),

угловые размеры, отклонение формы деталей (от окружности, не параллельности, неперпендикулярности, отклонение от линейности), определить профиль и шага резьбы. Точность измерения линейных размеров составляет 1 мкм.

6. Для определения основных закономерностей процесса многодисковой центробежной абразивной обработки проведены однофакторные и многофакторные эксперименты. Проведением однофакторных экспериментов и их влиянием на параметры процесса обработки установлено, что основные факторы режима обработки сильно влияющие на параметры производительности и точности обработки, это: линейная скорость инструмента, продолжительность обработки и зернистость абразива.

7. Для определения взаимосвязей основных факторов процесса многоинструментальной центробежной абразивной обработки с параметрами производительности, точностью формы, качеством поверхности необходимо провести многофакторные эксперименты.

8. Получены математические модели, устанавливающие связь параметров режима обработки с параметрами производительности, точностью формы, качеством поверхности.

## **Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ НА МНОГОДИСКОВОМ СТАНКЕ**

### **4.1. Анализ минералогического состава полудрагоценных и поделочных камней используемых в работе**

4.1.1. Специалистами Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ во исполнение обращения доктора PhD Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими Холова Фаридуна Буриевича от 19.06.2024г., выполнено определение минералогического состава галтовки из полудрагоценного и декоративного камня.

Для проведения исследования заказчиком был предоставлен образец галтовки из полудрагоценного и декоративного камня в виде сферы фиолетового цвета размером 10 мм.

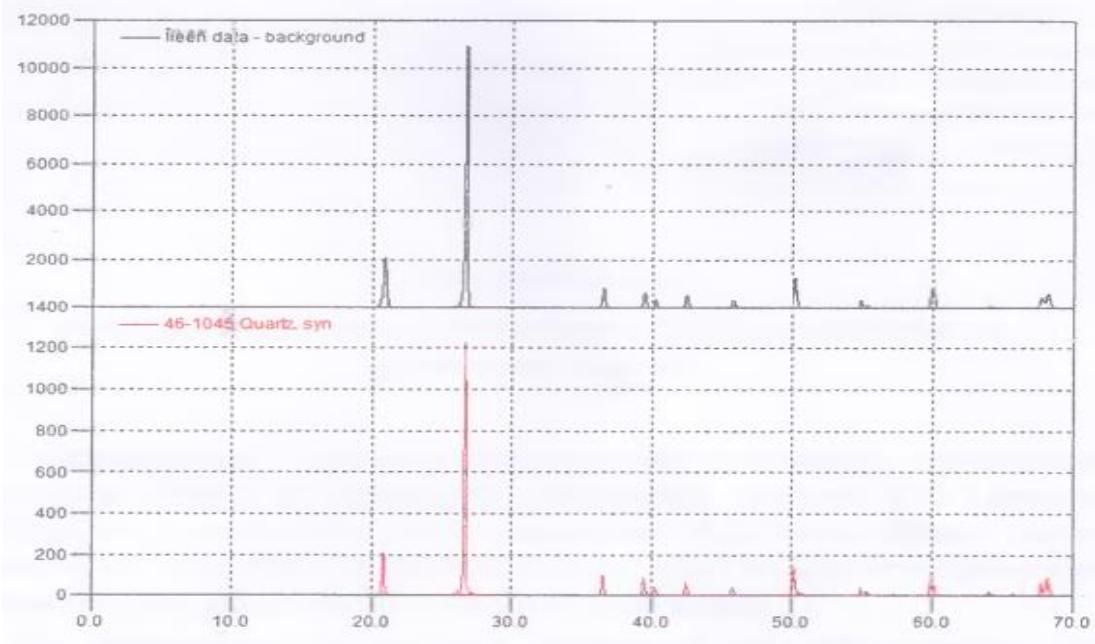
С целью определение минералогического состава породы было выполнено ее «истирание» на вибрационном истирателе КМ-1 до получения зернистости порошкового материала не более 0,5мм.

Определение минералогического состава производилось с применением рентгенофазового метода анализа на рентгеновском дифрактометре Дрон-3 (Си-анод и Ni-фильтр).

По результатам определения минералогического состава можно с уверенностью сказать, что исследованный образец является кварцем (рис. 4.1). Фиолетовый цвет образцу придают примеси двух- или трехвалентного железа Fe<sup>2+</sup> или Fe<sup>3</sup>, за счет чего исследованный образец относится к аметисту, входящего в группу полудрагоценных и коллекционных камней.

На основании анализа полученных по результатам экспериментальных исследований минералогического состава, представленного для исследования доктором PhD Холовым Фаридуном Буриевичем из Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими образца сделан следующий вывод:

1. Представленный образец галтовки является аметистом, относящимся к полудрагоценным и коллекционным камням.



**Рис. 4.1. Рентгенограмма снятого образца (верхний график) в сопоставлении с международной базой данных (нижний график)**

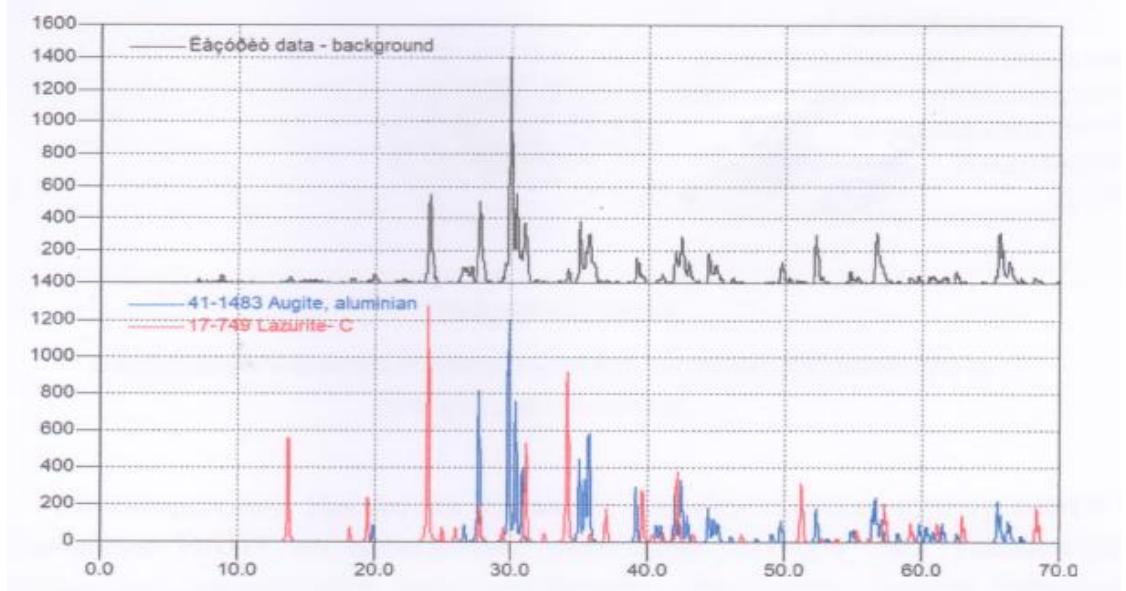
4.1.2. Специалистами Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ во исполнение обращения доктора PhD Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими Холова Фаридуна Буриевича от 19.06.2024г., выполнено определение минералогического состава галтовки из полудрагоценного и декоративного камня.

Для проведения исследования заказчиком был предоставлен образец галтовки из полудрагоценного и декоративного камня в виде сферы голубого цвета со светло-серыми прожилками размером 11 мм.

С целью определение минералогического состава породы было выполнено ее «истирание» на вибрационном истирателе КМ-1 до получения зернистости порошкового материала не более 0,5мм.

Определение минералогического состава производилось с применением рентгенофазового метода анализа на рентгеновском дифрактометре Дрон-3 (Сианод и Ni-фильтр).

По результатам определения минералогического состава можно с уверенностью сказать, что исследованный образец является смесью минералов из группы пироксенов и лазурита ( $\text{Na}_6 \text{Ca}_2 \text{Al}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{24} (\text{SO}_4)_2$  (рис.1).



**Рис. 4.1.2. Рентгенограмма снятого образца (верхний график) в сопоставлении с международной базой данных (нижний график)**

На основании анализа полученных по результатам экспериментальных исследований минералогического состава образца из полудрагоценного и декоративного камня сделаны следующие выводы:

- Предоставленный образец галтовки является смесью минерала лазурита ( $\text{Na}_6 \text{ Ca}_2 \text{ Al}_6 \text{ Si}_6 \text{ O}_{24} (\text{SO}_4)_2$ ) и пироксенов входящего в группу полудрагоценных и коллекционных камней.

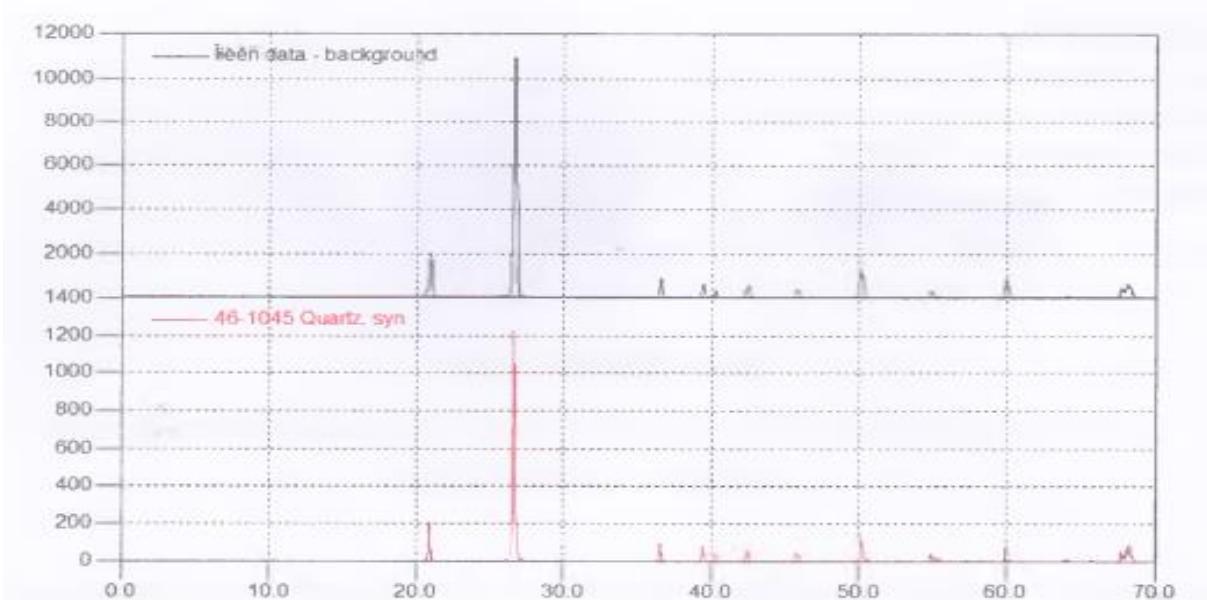
4.1.3. Специалистами Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ во исполнение обращения доктора PhD Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими Холова Фаридуна Буриевича от 19.06.2024г., выполнено определение минералогического состава галтовки из полудрагоценного и декоративного камня.

Для проведения исследования заказчиком был предоставлен образец галтовки из полудрагоценного и декоративного камня в виде сферы белого цвета размером 10 мм.

С целью определение минералогического состава породы было выполнено ее «истирание» на вибрационном истирателе КМ-1 до получения зернистости порошкового материала не более 0,5мм.

Определение минералогического состава производилось с применением рентгенофазового метода анализа на рентгеновском дифрактометре Дрон-3 (Сианод и Ni-фильтр).

По результатам определения минералогического состава можно с уверенностью сказать, что исследованный образец является кварцем ( $\text{SiO}_2$ ) (рис.1).



**Рис. 4.3. Рентгенограмма снятого образца (верхний график) в сопоставлении с международной базой данных (нижний график)**

На основании анализа полученных по результатам экспериментальных исследований минералогического состава образца полудрагоценного и декоративного камня сделаны следующие выводы:

1. Представленный образец галтовки несмотря на схожесть по своему внешнему декоративному виду мраморному ониксу, является кварцем.
2. Для исключения в дальнейшем путаницы при определении по внешнему виду кварца или оникса рекомендуется применять ручную диагностику в виде царапания образцов с помощью обычной иглы: мраморный оникс легко царапается из-за своей меньшей твердости по сравнению с кварцем. Также допустимо нанести каплю соляной кислоты на поверхность образца: при контакте с мраморным ониксом произойдёт бурная реакция с выделением пузырьков (кипение), тогда как при нанесении кислоты на кварц никакой химической реакции не наблюдается.

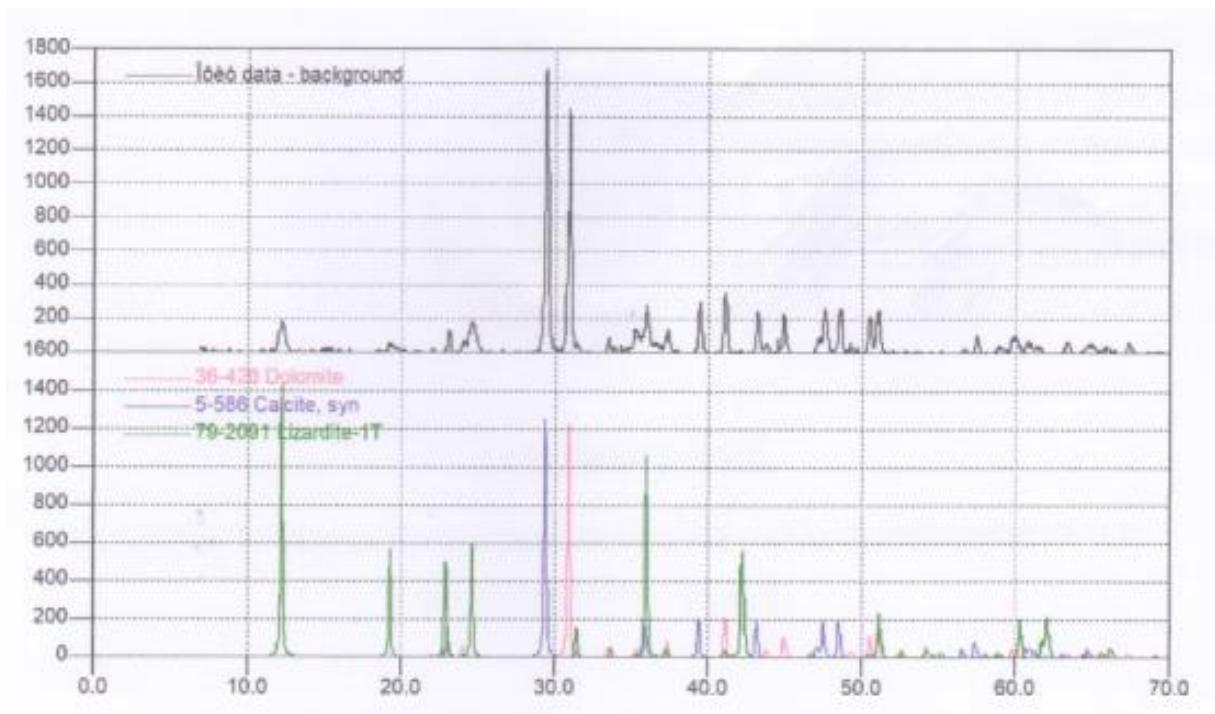
4.1.4. Специалистами Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ во исполнение обращения доктора PhD Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими Холова Фаридуна Буриевича от 19.06.2024г., выполнено определение минералогического состава галтовки из полудрагоценного и декоративного камня.

Для проведения исследования заказчиком был предоставлен образец галтовки из полудрагоценного и декоративного камня в виде сферы зеленого цвета размером 10 мм.

С целью определение минералогического состава породы было выполнено ее «истирание» на вибрационном истирателе КМ-1 до получения зернистости порошкового материала не более 0,5мм.

Определение минералогического состава производилось с применением рентгенофазового метода анализа на рентгеновском дифрактометре Дрон-3 (Суанод и Ni-фильтр).

По результатам определения минералогического состава можно с уверенностью сказать, что исследованный образец является смесью минералов доломита  $\text{Ca Mg} (\text{C O}_3)_2$ , кальцита  $\text{Ca C O}_3$  и лизардита  $\text{Mg}_3 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$  (рис.1).



**Рис. 4.4. Рентгенограмма снятого образца (верхний график) в сопоставлении с международной базой данных (нижний график)**

На основании анализа полученных по результатам экспериментальных исследований минералогического состава, представленного для исследования доктором PhD Холовым Фаридуном Буриевичем из Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими образца галтовки полудрагоценного и декоративного камня сделаны следующие выводы:

Представленный образец галтовки является смесью минералов доломита  $\text{Ca Mg} (\text{C O}_3)_2$ , кальцита  $\text{Ca C O}_3$  и лизардита  $\text{Mg}_3 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$ , что характерно для офита, относящемуся к декоративным и коллекционным камням.

## **4.2. Эксперименты и анализ результатов обработки**

### **4.2.1. Исследование величины съема от продолжительности обработки**

В процессе изготовления шариков из полудрагоценных и поделочных камней в качестве исходного материала обычно используются заготовки в форме кубиков. На стадии черновой обработки проводится удаление вершин и сглаживание рёбер, что позволяет приблизить форму заготовки к сфере. Для выполнения обработки применяются различные устройства, такие как галтовочные барабаны, центробежные и планетарные станки, а также абразивоструйные установки. Нынешние технологии центробежной абразивной обработки с использованием станков с вращающимся дном не позволяют эффективно обрабатывать верхние или лицевые поверхности заготовок, что является необходимым для достижения высокой качества обработки. Удаление материала на этих станках происходит преимущественно с наружной стороны, что обеспечивает объемную обработку изделий.

При снятие вершин и ребер одновременно происходит съем по всей поверхности, что в итоге уменьшает размеры заготовок и соответственно приводить к уменьшение диаметра получаемых шариков.

Процесс изготовления изделий из полудрагоценных и поделочных камней, в частности, полудрагоценных, требует особого внимания, так как неосторожные действия могут привести к значительной потере ценного

материала. Результаты исследований показали, что внедрение центробежной абразивной обработки с использованием инструментов с фиксированным абразивом, а также современных станков с вращающимся дном, обеспечивает высокую эффективность и производительность процесса. Такой подход позволяет рационально формировать изделия, преобразуя заготовки из кубической формы в сферическую.

При обработке на этих станках наряду с высокой производительности уменьшается процесс поломки камней. Данный процесс обработки наиболее эффективно можно производить использованием алмазных кругов.

Обработка при этом производится алмазоносным периферийным торцом круга. Количество одновременно обрабатываемых заготовок определяется диаметром круга и размерами кубиков. Набольшую производительность достигается, когда заготовки размещаются по кругу в один ряд (рис.1.5). В данном рисунке 1 барабан, 2 заготовки с исходной кубической формы, 3 алмазный круг. Максимальное количество одновременно обрабатываемых заготовок на одном инструменте при этом можно определит как:  $n=\pi D/1,71A$ , где  $n$ -количество заготовок,  $D$ -диаметр инструмента, размер куба (длина ребра). Так как устройство позволяет одновременно обрабатывать несколькими инструментами, общее количество заготовок для одной загрузки можно определить как  $n_0=nK$ , где  $K$  количество одновременно работающих инструментов. Другое преимущество обработки на данном станке является то, что можно одновременно обработать заготовки из различных материалов с различными физико-химическими свойствами использованием отдельных инструментов.

Использовать инструменты разной зернистости можно осуществить черновую и чистовую обработку. От параметров режима обработки зависят показатели производительности обработки и исправления формы шариков. Исходя из этого производим экспериментальные исследования различных факторов на параметры процесса обработки.

Продолжительность обработки является один из факторов влияющий на качество и производительность обработки. Проведены экспериментальные

исследования по изучению влияния продолжительности обработки на величину съема результаты, которых приведены ниже.

Основными факторами, оказывающими наибольшее влияние на производительность и качество обработки, являются линейная скорость инструмента, размер абразивного зерна и время обработки. Линейная скорость инструмента составляет от 7,85 м/с до 15,7 м/с, время обработки – от 10 до 60 минут, размер абразивного зерна от 320 до 600 микрометр.

Обработка производилась в сухой и жидкостной среде. Результаты проведённых экспериментов представлены в графической форме.

Математической обработкой результатов эксперимента, приведенной методом наименьших квадратов получены формулы зависимости производительности от исследуемых факторов. В рассматриваемых интервалах зависимости близки к линейной функции. Функциональная зависимость производительности процесса от продолжительности обработки приведены в формулах 4.1-4.18.

В формулах 4.1-4.6 представлены соотношения между величиной съемки и временем обработки при работе с офитом. В частности, формулы 4.1-4.3 относятся к сухому методу обработки, тогда как 4.4-4.6 описывают жидкостную обработку. Кроме того, зависимости производительности от продолжительности обработки лазурита указаны в формулах 4.7-4.12. Формулы 4.7-4.9 при сухой обработке лазурита, и 4.10-4.12 при обработке в жидкостной среде.

Зависимость производительности обработки аметиста от времени показана в формулах 4.13 - 4.15 для сухой обработки и в формулах 4.16 - 4.18 для обработки в жидкой среде. Исследование влияние производительности от времени при сухой и жидкостной обработке офита, лазурита и аметиста приведены в формулах 4.1.- 4.18.

### **Обработка офита:**

$$Q_{1c} = f(t) = 0,2 + 0,2948t \text{ - при } V = 7,85 \text{ м/сек; } \quad (4.1)$$

$$Q_{2c} = 0,2 + 0,397t \text{ - при } V = 13,08 \text{ м/сек; } \quad (4.2)$$

$$Q_{3c} = 0,8 + 0,587t \text{ - при } V=15,7 \text{ м/сек; } \quad (4.3)$$

$$Q_{1ж} = f(t) = 1,4 + 0,34t \text{ - при } V=7,85 \text{ м/сек; } \quad (4.4)$$

$$Q_{2ж} = 1,2 + 0,56t \text{ - при } V=13,08 \text{ м/сек; } \quad (4.5)$$

$$Q_{3ж} = 5,6 + 0,53t, \text{ - при } V=15,7 \text{ м/сек; } \quad (4.6)$$

### **Обработка лазурита:**

$$Q_{1c} = f(t) = -0,2 + 0,2636t \text{ - при } V=7,85 \text{ м/сек; } \quad (4.7)$$

$$Q_{2c} = -0,1 + 0,4t \text{ - при } V=13,08 \text{ м/сек; } \quad (4.8)$$

$$Q_{3c} = -0,8 + 0,553t \text{ - при } V=15,7 \text{ м/сек; } \quad (4.9)$$

$$Q_{1ж} = f(t) = 0,367t \text{ - при } V=7,85 \text{ м/сек; } \quad (4.10)$$

$$Q_{2ж} = 7 + 0,4t \text{ - при } V=13,08 \text{ м/сек; } \quad (4.11)$$

$$Q_{3ж} = 5,6 + 0,53t, \text{ - при } V=15,7 \text{ м/сек; } \quad (4.12)$$

### **Обработка аметиста**

$$Q_{1c} = f(t) = 0,3 + 0,138t \text{ - при } V=7,85 \text{ м/сек; } \quad (4.13)$$

$$Q_{2c} = -0,3 + 0,6t \text{ - при } V=13,08 \text{ м/сек; } \quad (4.14)$$

$$Q_{3c} = -1,1 + 0,402t \text{ - при } V=15,7 \text{ м/сек; } \quad (4.15)$$

$$Q_{1ж} = f(t) = -0,3 + 0,275t \text{ - при } V=7,85 \text{ м/сек; } \quad (4.16)$$

$$Q_{2ж} = 4,5 + 0,39t \text{ - при } V=13,08 \text{ м/сек; } \quad (4.17)$$

$$Q_{3ж} = 5,2 + 0,47t \text{ - при } V=15,7 \text{ м/сек; } \quad (4.18)$$

## **4.2.2. Влияние линейной скорости инструмента на производительность обработки**

Линейная скорость инструмента  $V$  — это расстояние, которое проходит точка на его максимальном диаметре за одну секунду.

$$V = \frac{\pi Dn}{60 * 1000},$$

где:  $D$ -диаметр инструмента,  $n$ - частота вращение инструмента (об/с).

Проведены экспериментальные исследования влияние скорости резания на производительность обработки. Скорость резания варьировался в диапазоне от 2 до 28 м/сек. Максимальная скорость инструмента ограничивалася показателями поломки исходных заготовок. Скорость ограничивалася возрастание поломки до 5%. Производилась обработка в водной среде и в

сухую. Как видно из графиков производительность обработки возрастает с увеличением линейной скорости инструмента. Данная зависимость нелинейна. Анализ результатов подтверждает, что в жидкостной среде интенсивность съема и соответственно производительность выше, чем при сухой обработке.

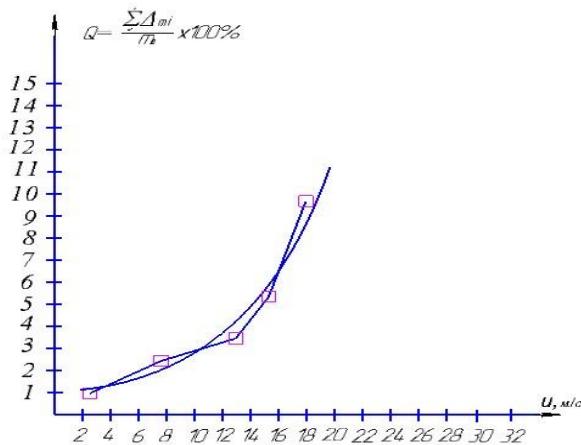


Рис. 4.1. График зависимости производительности от линейной скорости инструмента при сухой обработке лазурита. 1. Экспериментальные данные; 2. Аппроксимация результатов эксперимента.

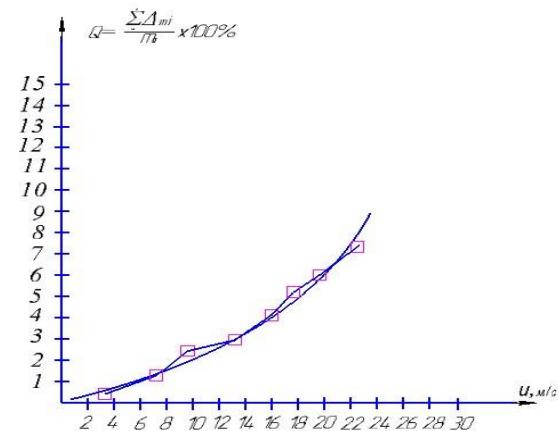


Рис.4.3. График зависимости производительности от линейной скорости инструмента при сухой обработке аметиста. 1. Экспериментальные данные; 2. Аппроксимация результатов эксперимента.

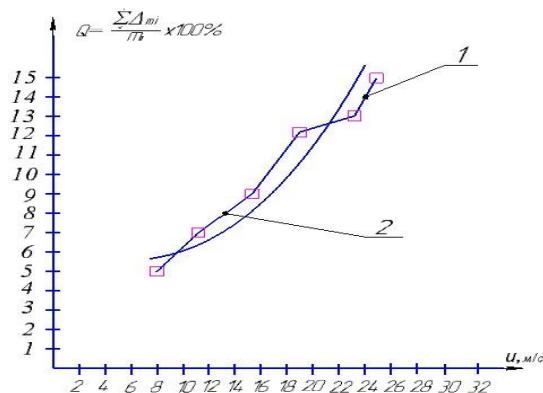


Рис.4.2. График зависимости производительности от линейной скорости инструмента при обработке лазурита в жидкой среде. 1. Экспериментальные данные; 2. Аппроксимация результатов эксперимента.

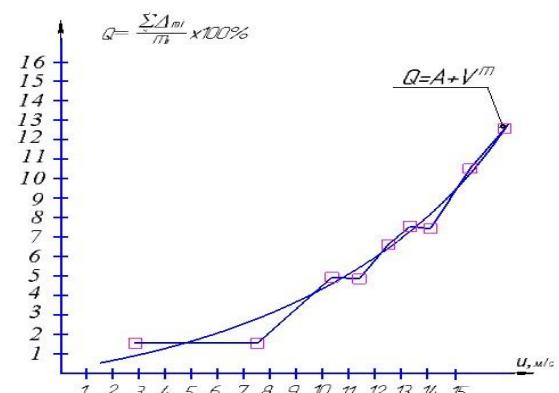


Рис.4.4. График зависимости производительности от линейной скорости инструмента при обработке аметиста в жидкой среде. 1. Экспериментальные данные; 2. Аппроксимация результатов эксперимента.

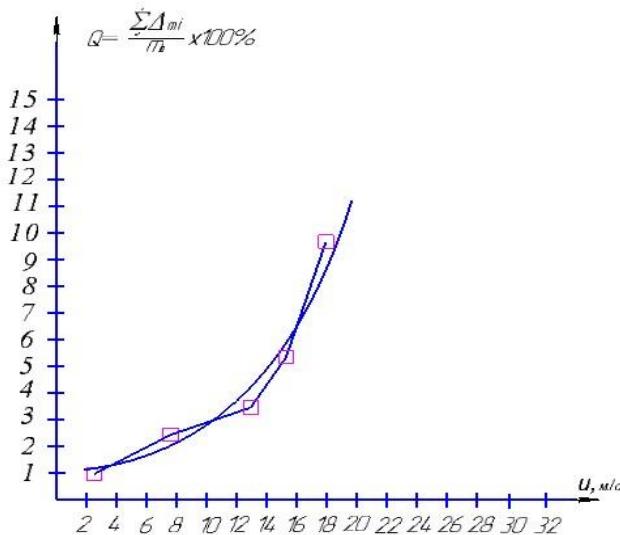


Рис.4.5. График зависимости производительности от линейной скорости инструмента при сухой обработке офита. 1. Экспериментальные данные; 2. Аппроксимация результатов эксперимента.

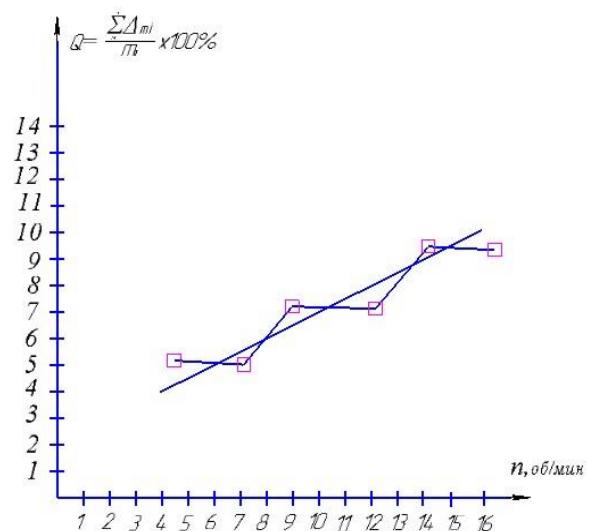


Рис.4.6. График зависимости производительности от линейной скорости инструмента при обработке офита в жидкой среде. 1. Экспериментальные данные; 2. Аппроксимация результатов эксперимента

#### 4.2.3. Исследование влияние режимов обработки на точность формы

При оценке исправление формы измеряли наибольшие и наименьшие размеры исходных заготовок до обработки и после. Исходные заготовки в данном случае, это предварительно галтованные кубики, где сглажены их острые грани и ребра. Так как исходные заготовки имеют разные размеры, их погрешности сильно отличаются. Для объективной оценки исправления формы оценивалось в процентах. При количестве заготовок в одновременно обрабатываемой партии 50 штук, было произведено измерение каждой заготовки в отдельности. По результатам измерения определяли среднее значение погрешности до обработки как сумму погрешностей всех заготовок на их количество- $\sum_1^{50} L_i / 50$ . Таким образом, были определены средние значения погрешности при обработке.

Процент исправления формы определяется как соотношение величины исправления погрешности после обработки к первоначальной погрешности заготовки.

Величину исправления погрешности после обработки можно вычислить по формуле  $(L_{0cp} - L_{1cp}) - (L_{01cp} - L_{1.1cp})$ , где  $L_{0cp}$  и  $L_{1cp}$  обозначают средние значения наибольшего и наименьшего размеров исходной партии заготовок, а  $L_{01cp}$  и  $L_{1.1cp}$  — средние значения наибольшего и наименьшего размеров заготовок после их обработки. Например, для исходной заготовки величину погрешности можно определить как:  $\Delta_{1cp} = L_{0cp} - L_{1cp}$ . Подобным образом определяем величину погрешности после обработки  $\Delta_{2cp} = L_{01cp} - L_{1.1cp}$ .

Тогда изменение формы в процентах определяется как:

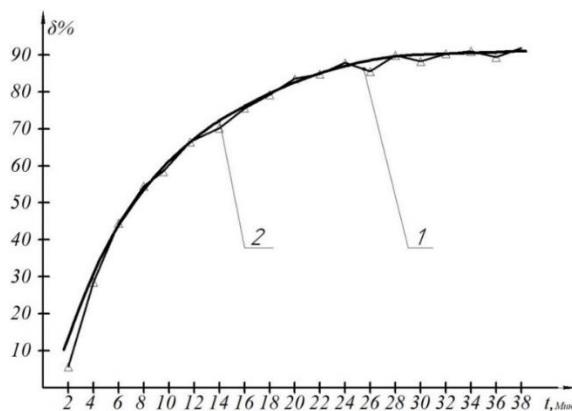
$$\delta = ((L_{0cp} - L_{1cp}) - (L_{01cp} - L_{1.1cp})) / (L_{0cp} - L_{1cp}) \times 100\%$$

При обработке шарообразных заготовок отклонение от правильной геометрической формы оценивается как разность наибольшего и наименьшего диаметров шарика. Чем меньше этот разность, тем ближе к шару данная заготовка. В случае, когда диаметры по всем направлениям измерений одинаковы, мы получаем идеальную шар.

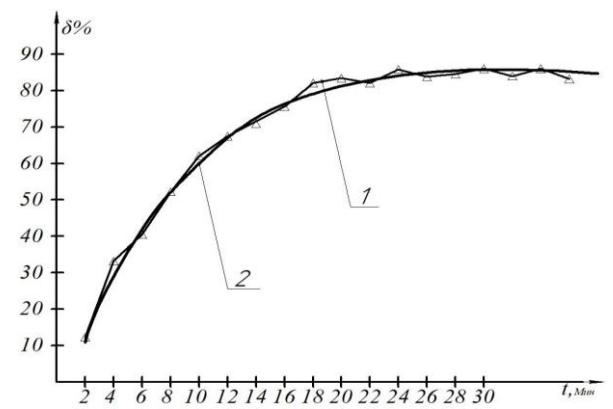
При экспериментальных исследованиях зависимости производительности и точности формы от режимов обработки использовались предварительно галтованные кубики. Наибольшие и наименьшие размеры галтованных кубиков находились в пределах: наибольший 18 мм и наименьший 12 мм. Результаты эксперимента по итоги эксперимента по исправление формы представлены ниже (рисунки 4.7-4.12). На рисунке 4.7 иллюстрируется связь между исправлениями формы и продолжительностью обработки. Материал заготовок лазурит. На рисунке 4.7. показано сухая обработка, а на рисунке 4.8 обработка в жидкостной среде.

Результаты экспериментов показывают, что вначале процесса обработки происходит интенсивная коррекция формы. После достижения определенного значения коррекция формы замедляется и практически прекращается. Это можно наблюдать на примере обработки лазурита. Так, минимальный и максимальный размеры исходной партии заготовок лазурита составляли 10,73мм и 19,37 мм соответственно. В данном случае разница между максимальным и минимальным размерами составляет 8,54 мм. Примерно через

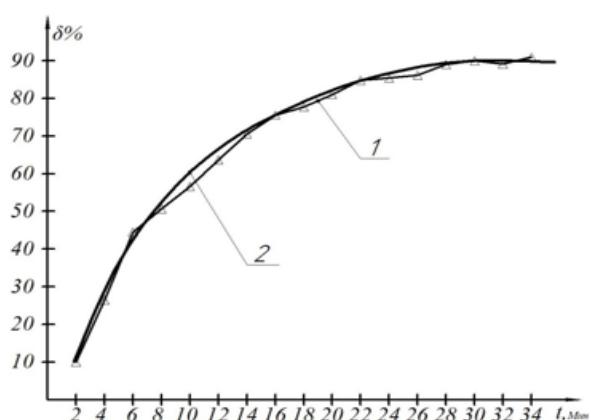
25 минут обработки минимальный и максимальный размеры составили 9,85 мм и 10,7 мм соответственно. Разница в размерах в данном случае составляет 0,85 мм. Исправление формы в данном случае составляет 90%. Как видно из графика, исправление формы стабилизируется, и дальнейшая обработка не приводит к дальнейшей уточнение формы.



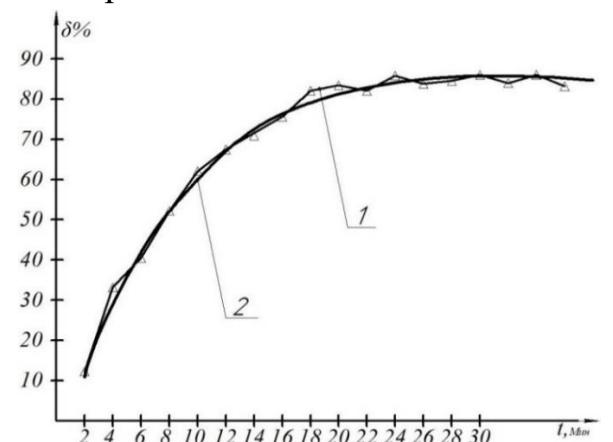
**Рис.4.7.** График зависимости исправление формы от времени обработки при сухой обработке лазурита. Примечание: 1. Расположение экспериментальных точек; 2. Аппроксимация результатов эксперимента.



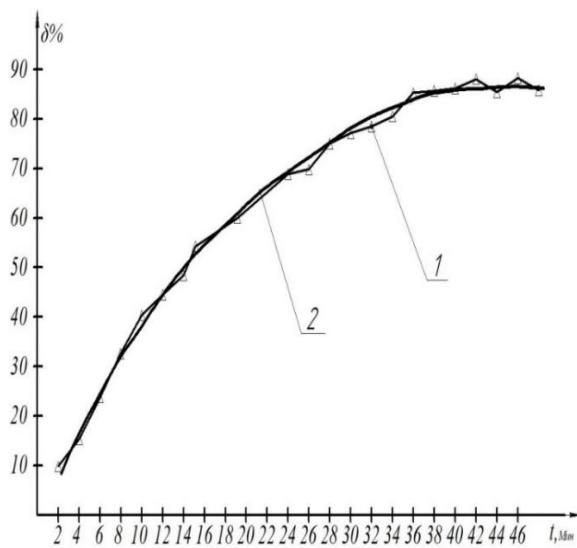
**Рис.4.9.** График зависимости исправление формы от времени при сухой обработке офита. Примечание: 1. Расположение экспериментальных точек; 2. Аппроксимация результатов эксперимента.



**Рис. 4.8.** График зависимости исправление формы от времени обработки при мокрой обработке лазурита. Примечание: 1. Расположение экспериментальных точек; 2. Аппроксимация результатов эксперимента

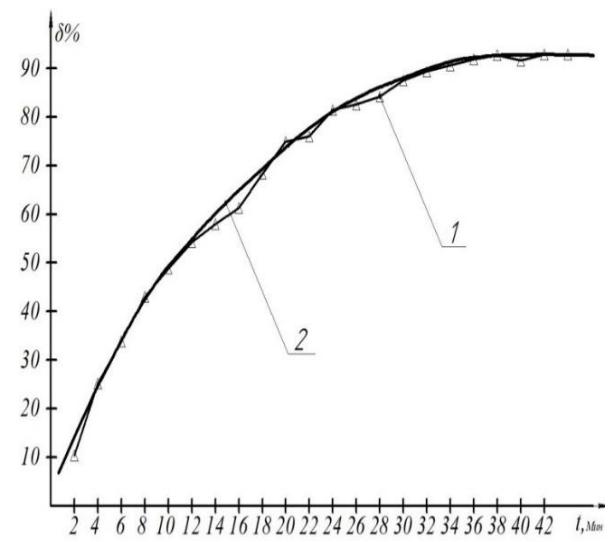


**Рис. 4.10.** График зависимости исправление формы от времени при обработке офита в жидкой среде. Примечание: 1. Расположение экспериментальных точек; 2. Аппроксимация результатов эксперимента



**Рис. 4.11.** График зависимости исправление формы от времени при сухой обработке аметиста.

Примечание: 1. Расположение экспериментальных точек 2. Апроксимация результатов эксперимента



**Рис.4.12.** График зависимости исправление формы от времени при обработке аметиста в жидкой среде. Примечание: 1. Расположение экспериментальных точек 2. Апроксимация результатов эксперимента.

### 4.3. Центробежное объемное шлифование

Рассмотрена также вопросы проведения многофакторных экспериментов и обработки экспериментальных данных. Многофакторные эксперименты позволяют уточнить взаимосвязи между факторами и их влияние на параметры обработки. В ходе многофакторных экспериментов применялся метод полного факторного эксперимента. В таблице 4.1 представлена матрица для планирования эксперимента.

В данной таблице  $x_1, x_2, x_3$ - кодированные значения факторов. Эффект взаимодействия факторов учитываются посредством  $x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$ .

Уравнение зависимости параметра процесса от факторов

$$\tilde{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{1,2}x_1x_2 + b_{1,3}x_1x_3 + b_{2,3}x_2x_3 + b_{1,2,3}x_1x_2x_3 \quad (4.19)$$

**Таблица 4.1.**

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Параметр
1	+	+	+	+	+	+	+	y <sub>1</sub>
2	-	+	+	-	-	+	-	y <sub>2</sub>
3	+	-	+	-	+	-	-	y <sub>3</sub>
4	-	-	+	+	-	-	+	y <sub>4</sub>
5	+	+	-	+	-	-	-	y <sub>5</sub>
6	-	+	-	-	+	-	+	y <sub>6</sub>
7	+	-	-	-	-	+	+	y <sub>7</sub>
8	-	-	-	+	+	+	-	y <sub>8</sub>

В качестве заготовок для обработки использовались предварительно нарезанные кубики из офита, лазурита и аметиста. Интервалы варьирования факторов выбраны исходя из возможности оборудования и составляют:

- 1) линейная скорость вращения барабана - V = 7,85 ÷ 15,7 м/сек; интервал варьирования 3,925; среднее значение интервала 11,775;
- 2) продолжительность обработки t = 10 ÷ 20 мин; интервал варьирования 5мин; среднее значение интервала 15мин;
- 3) зернистость абразива - Z = 320-500 мкм; интервал варьирования 90мкм; среднее значение интервала 410мкм.

Уравнения связывающие кодированные значения факторов с их натуральными значениями следующее:

$$x_1 = \frac{\tilde{x}_1 - 11,775}{3,925}, \quad x_2 = \frac{\tilde{x}_2 - 15}{5}, \quad x_3 = \frac{\tilde{x}_3 - 410}{90}.$$

В качестве параметров обработки выбрали: производительность обработки  $Q = (\frac{\Delta m}{m}) \times 100\%$ , где m- масса заготовки до обработки, (грамм);  $\Delta m$  - потеря массы за счет обработки, (граммы) и точность формы изделия. На этой таблице приведены режимы и результаты процесса шлифовки офита, лазурита и аметиста без охлаждения

**Таблица 4.2**

<b>Офит</b>							
<b>№</b>	<b>V, м/сек</b>	<b>t, мин</b>	<b>Z, мкм</b>	<b>масса до обработки, грамм</b>	<b>масса после обработки, грамм</b>	<b>Δm</b>	<b>Q=(Δm/m) x 100%</b>
1	15,7	20	500	104,7	103,3	1,4	1,3372
2	7,85	20	500	101,9	100	1,9	-1,8646
3	15,7	10	500	99,3	98	1,3	1,3092
4	7,85	10	500	98	96,1	1,9	-1,9388
5	15,7	20	320	96,1	95	1,1	1,1446
6	7,85	20	320	93,3	92	1,3	-1,3934
7	15,7	10	320	92	90,9	1,1	1,1957
8	7,85	10	320	90,9	89,6	1,3	-1,4301
<b>Лазурит</b>							
<b>№</b>	<b>V, м/сек</b>	<b>t, мин</b>	<b>Z, мкм</b>	<b>Масса до обработки, грамм</b>	<b>Масса после обработки, грамм</b>	<b>Δm</b>	<b>Q=(Δm/m) x 100%</b>
1	15,7	20	500	90	89,6	0,4	0,4444
2	7,85	20	500	68,7	68,4	0,3	0,4367
3	15,7	10	500	68,4	68,2	0,2	0,2924
4	7,85	10	500	68,2	67,9	0,3	0,4399
5	15,7	20	320	67,9	67,7	0,2	0,2946
6	7,85	20	320	67,7	67,5	0,2	0,2954
7	15,7	10	320	67,5	67,1	0,4	0,5926
8	7,85	10	320	67,1	66,8	0,3	0,4471
<b>Аметист</b>							
<b>№</b>	<b>V, м/сек</b>	<b>t, мин</b>	<b>Z, мкм</b>	<b>Масса до обработки, грамм</b>	<b>Масса после обработки, грамм</b>	<b>Δm</b>	<b>Q=(Δm/m) x 100%</b>
1	15,7	20	500	94,3	93,9	0,4	0,4242
2	7,85	20	500	93,9	93,4	0,5	0,5325
3	15,7	10	500	93,4	92,8	0,6	0,6424
4	7,85	10	500	92,8	92	0,8	0,8621
5	15,7	20	320	92	91,8	0,2	0,2174
6	7,85	20	320	91,8	91,6	0,2	0,2179
7	15,7	10	320	91,6	91,3	0,3	0,3275
8	7,85	10	320	91,3	91,1	0,2	0,2191

Уравнение математической модели зависимости производительности от режимов при обработке:

**для офита:**

$$Q_{\text{офит}} = 1,4517 - 0,205\bar{x}_1 - 0,01675\bar{x}_2 + 0,16075\bar{x}_3 + 0,011\bar{x}_1\bar{x}_2 - 0,0842\bar{x}_1\bar{x}_3 + 0,0052\bar{x}_2\bar{x}_3 + 0,014575\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 = 1,4517 - 0,205\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right) - 0,01675\left(\frac{t-15}{5}\right) + 0,16075\left(\frac{Z-410}{90}\right) - 0,011\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right)\left(\frac{t-15}{5}\right) - 0,084225\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right)\left(\frac{Z-410}{90}\right) + 0,0052\left(\frac{t-15}{5}\right)\left(\frac{Z-410}{90}\right) + 0,014575\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right)\left(\frac{t-15}{5}\right)\left(\frac{Z-410}{90}\right).$$

**для лазурита:**

$$Q_{\text{лазур}} = 0,405388 + 0,000613\bar{x}_1 - 0,03761\bar{x}_2 - 0,00204\bar{x}_3 + 0,001113\bar{x}_1\bar{x}_2 - 0,03556\bar{x}_1\bar{x}_3 + 0,074813\bar{x}_2\bar{x}_3 + 0,037688\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 = 0,405388 + 0,000613\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right) - 0,03761\left(\frac{t-15}{5}\right) - 0,00204\left(\frac{Z-410}{90}\right) + 0,001113\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right)\left(\frac{t-15}{5}\right) - 0,03556\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right)\left(\frac{Z-410}{90}\right) + 0,074813\left(\frac{t-15}{5}\right)\left(\frac{Z-410}{90}\right) + 0,037688\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right)\left(\frac{t-15}{5}\right)\left(\frac{Z-410}{90}\right).$$

**для аметиста:**

$$Q_{\text{аметист}} = 0,430388 - 0,02751\bar{x}_1 - 0,08239\bar{x}_2 + 0,184913\bar{x}_3 + 0,000313\bar{x}_1\bar{x}_2 - 0,05449\bar{x}_1\bar{x}_3 - 0,05456\bar{x}_2\bar{x}_3 + 0,027538\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 = 0,430388 - 0,02751\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right) - 0,08239\left(\frac{t-15}{5}\right) + 0,184913\left(\frac{Z-410}{90}\right) + 0,000313\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right)\left(\frac{t-15}{5}\right) - 0,05449\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right)\left(\frac{Z-410}{90}\right) - 0,05456\left(\frac{t-15}{5}\right)\left(\frac{Z-410}{90}\right) + 0,027538\left(\frac{V-11,775}{3,925}\right)\left(\frac{t-15}{5}\right)\left(\frac{Z-410}{90}\right).$$

Полученные уравнения зависимости производительности от режимов обработки позволяют определить потери массы заготовок для получения готовых, что дает возможность определить исходную массу заготовок, и необходимое количество сырье для производство запланированное количество изделий.

#### 4.4. Исследование шероховатости поверхностей при центробежном объемном шлифовании

Многодисковая центробежная абразивная галтовка не обеспечивают требуемые параметры качества поверхности. Для получения зеркальной поверхности полированием необходимо обеспечить исходные параметры шероховатости поверхности в пределах  $R_a = 0,4-0,6$  мкм. После многодисковой центробежной обработки шариков шероховатости поверхности составляет  $R_a =$

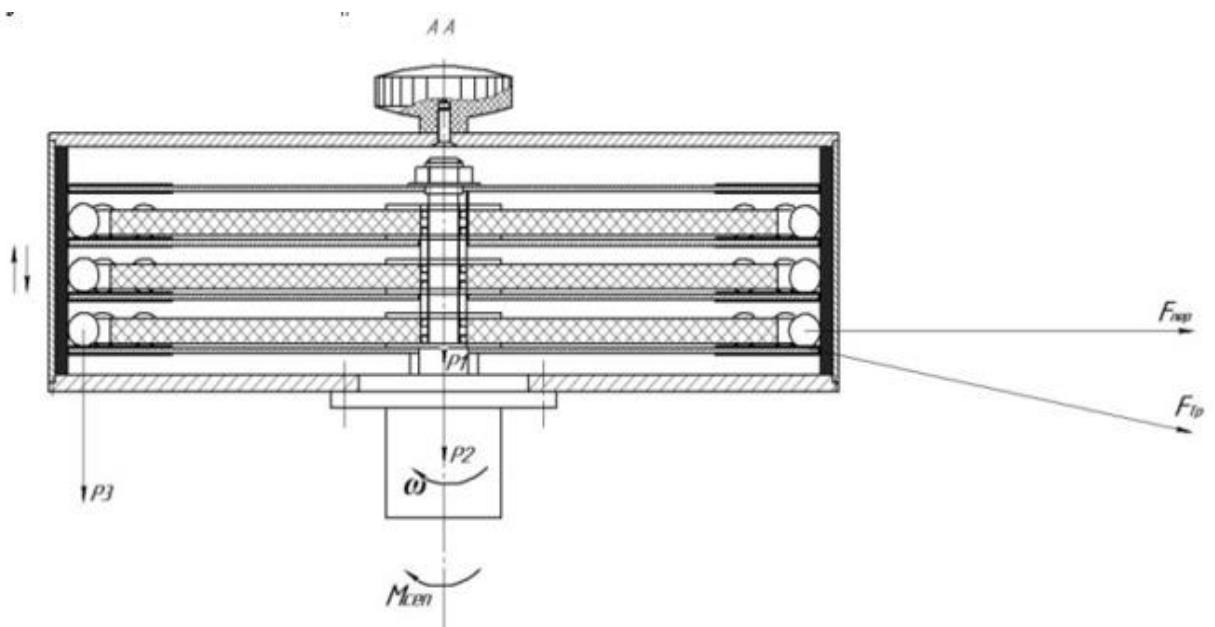
0,8-1,3 мкм, а отклонение от круглоты 0,6-1,8 мм. Для дальнейшей исправление формы и снижение шероховатости осуществляем объемное шлифование в кассетах. Процесс шлифование производится на этом же станке с использованием специальных кассет (рис.4.13).

На данном станке можно осуществить также полирование заготовок. Шлифование и полирование осуществляются применением специальных кассет вставленные вместо абразивных дисков (рис.4.14).

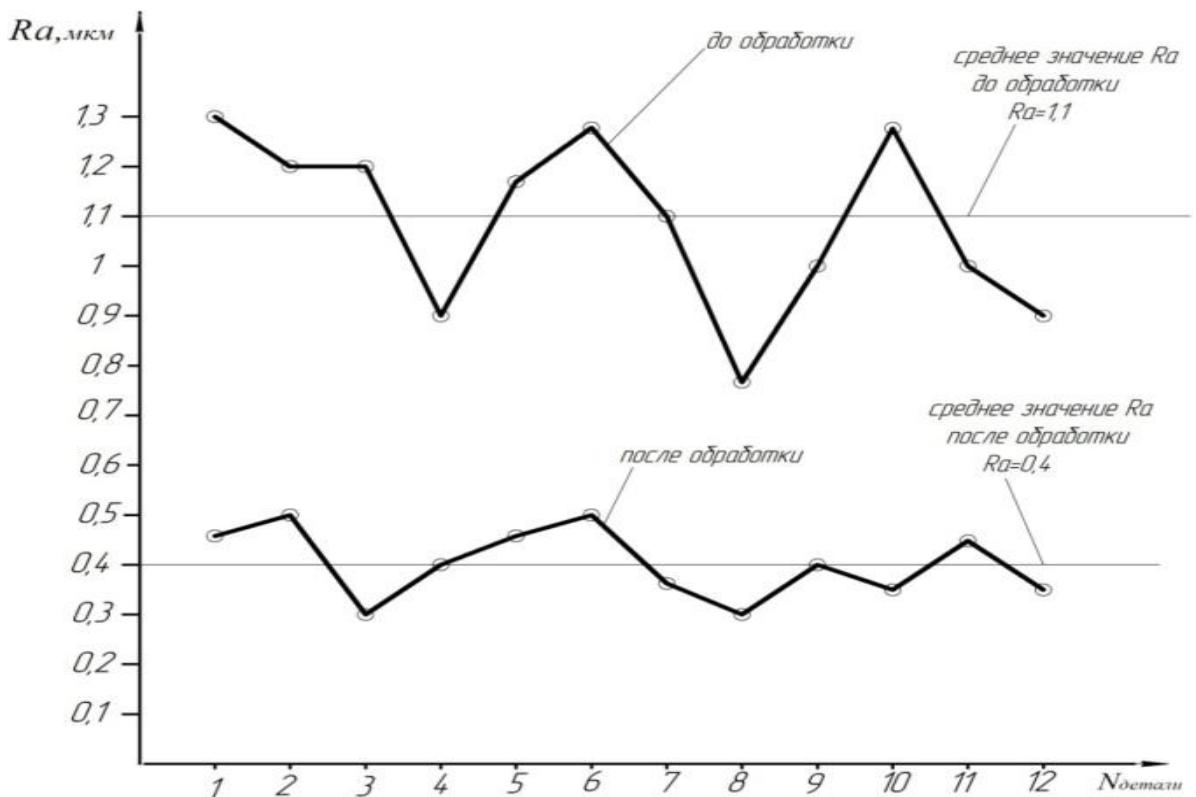


**Рис.4.13. Кассетные инструменты для центробежной абразивной обработки шариков**

При шлифовании в кассетах обеспечивается шероховатость поверхности изделия в пределах  $R_a = 0,3-0,5$  мкм (рис.4.15), что даёт возможность последующим полированием обеспечить требуемую качество изделия.



**Рис. 4.14. Схема обработки шариков из полудрагоценных и поделочных камней на многодисковом центробежном станке**



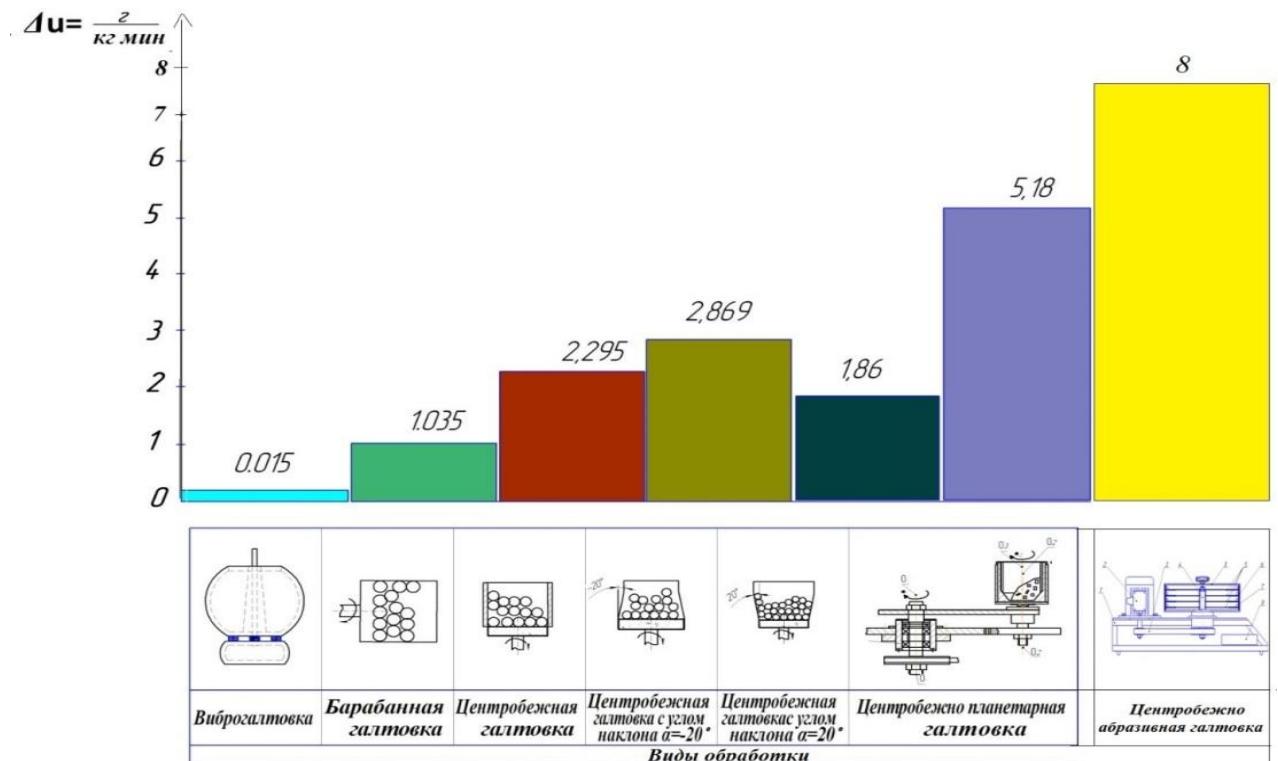
**Рис. 4.15. Изменение шероховатости до обработки и после обработке на многокассетном центробежном станке.**

#### 4.5. Сравнительный анализ

##### 4.5.1. Сравнение способов обработки по производительности

На рис. 4.16 представлено сравнение различных методов обработки самоцветов с точки зрения их производительности. Производительность каждого из методов была установлена в результате экспериментальных исследований. Оценка производительности проводилась как количество материала, обрабатываемого за одну минуту с 1 кг заготовки. Показатели производительности выражены в г/кг мин. Из рисунка видно, что виброгалтовка имеет наименьшую производительность, в то время как производительность многодискового станка превосходит таковую других методов. Этот способ обработки позволяет формировать сферические тела из исходных кубиков без необходимости промежуточной обработки.

Применяя указанную схему (рис. 2.15), процесс обработки для шаров диаметром свыше 40 мм может быть задействован для сглаживания острых углов после резки.



**Рис.4.16. Сравнение разных видов галтовки по производительности**

В связи с этим, разработанная конструкция станка обеспечивает существенное повышение производительности и точности обработки изделий, таких как шарики из полудрагоценных и поделочных камней. Кроме того, расширенные функциональные возможности устройства позволяют одновременно обрабатывать материалы с различными физико-химическими свойствами. По результатам экспериментальных исследований установлено, что производительность многодискового станка достигает  $8 \text{ г}/(\text{кг} \cdot \text{мин})$ , что значительно превосходит производительность барабанной галтовки ( $1.035 \text{ г}/(\text{кг} \cdot \text{мин})$ ) и планетарно-центробежной обработки  $5.18 \text{ г}/(\text{кг} \cdot \text{мин})$ ).

#### 4.6. Заключение к главе IV

1. Разработан и изготовлен станок для многодисковой центробежной абразивной обработки, защищенный патентом (патент малой формы № TJ 1361. Душанбе: 2023.; Заявка №2201668).

2. Проведены экспериментальные работы по обработке на многодисковом станке, в результате которых выявлены ключевые закономерности данного процесса.

3. В ходе экспериментов были определены основные факторы, оказывающие влияние на производительность и точность многодисковой центробежной абразивной обработки.

4. Установлены зависимости между режимами обработки, зернистостью абразива и производительностью процесса, а также корректировкой формы при обработке.

5. Определены влияние времени обработки и линейной скорости инструмента на объем снятого материала, выраженного в процентах от начальной массы заготовок.

6. Анализ результатов, полученных с использованием данного метода, демонстрирует, что значения отклонения формы остаются сравнительно низкими. Это позволяет применять его в процессах чистовой обработки.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

1. В ходе исследования выполнены научно обоснованные разработки в области технологии и конструктивных решений, направленные на повышение эффективности обработки изделий из хрупких неметаллических материалов. Результаты подтверждены рядом публикаций и научных трудов [1-А-24-А].

2. Разработан и запатентован станок новой конструкции для центробежной абразивной обработки (малый патент № ТJ 1361), который позволяет формировать сферические заготовки из кубических блоков, вырезанных из полудрагоценных и поделочных камней, без необходимости предварительной или промежуточной обработки. Эффективность предложенного решения подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями, а также отражена в ряде публикаций [1-А-2-А], [5-А-6-А], [8-А], [15-А-17-А], [19-А-24-А].

3. Приведены конструкторские и технологические разработки, по проектирование и изготовление станка для обработки полудрагоценных и поделочных камней обеспечивающий повышение производительности и качество обработки [1-А-2-А], [5-А-6-А], [8-А], [11-А-14-А], [15-А-19-А], [20-А-24-А].

4. Установлена зависимость производительности обработки от технологических факторов, таких как: линейная скорость инструмента, время обработки и влияние жидкой составляющей загрузки на производительности обработки [1-А-2-А], [5-А-6-А], [8-А], [11-А], [15-А], [23-А-24-А].

5. Установлены зависимости производительности от режимов обработки позволяющие определить потери массы заготовок при получении готовых изделий, что дает возможность определить необходимое количество сырье для производство требуемого количества изделий [1-А-3-А], [5-А-8-А], [12-А-22-А].

6. Исследованы зависимости шероховатости поверхности от режимов обработки, что дает возможность управлять качеством изделий на стадии их изготовления [1-А-10-А], [12-А-24-А].

7. Изучен процесс взаимосвязи обрабатываемой поверхности с абразивным материалом во время обработки, а также определено, как количество абразива оказывается на производительность обработки [1-А-2-А], [5-А-9-А], [15-А], [16-А], [18-А-24-А].

8. С помощью математической модели были определены воздействия технологических факторов на эффективность обработки. Эти влияния представлены в форме модели, созданной посредством многофакторного экспериментального проектирования и статистической анализа полученных данных [1-А-6-А], [8-А-11-А], [13-А-18-А].

9. Полученные уравнения зависимости производительности от режимов обработки позволяют определить потери массы заготовок для получения готовых изделий в зависимости от режимов обработки, что дает возможность определить исходную массу заготовок, и необходимое сырье для производства запланированного количества изделия [8-А], [11-А-12-А], [23-А-24-А].

**Рекомендации по практическому использованию результатов:**

- полученные результаты рекомендуется применять при разработке технологических процессов механической и абразивной обработки шариков из полудрагоценных и поделочных камней на предприятиях, занимающихся изготовлением декоративных и ювелирных изделий;

- использование центробежных станков позволяет повысить производительность обработки за счёт одновременной обработки большого количества заготовок при равномерном распределении абразивной нагрузки;

- предложенный способ обработки шариков из полудрагоценных и поделочных камней позволяет существенно повысить производительность обработки и качество изделий в условиях серийного производства, что считалось невозможным при использование существующих способах обработки;

- в производственных условиях НПП «РУХОМ» внедрена новая технология обработки полудрагоценных и поделочных камней в многопрофильном производстве.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ящерицыш, П.И., Зайцев, А.Г. Повышение качества шлифованых поверхностей и режущие свойства абразивно-алмазного инструмента. - Мн.: Наука и техника, 1972. - 478 с.
2. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов. - М.: Машиностроение, 1974. - 320 с.
3. Кремень, З.И., Медведев, В.В., Дугин, В.Н. Качество поверхностного слоя металла при обработке абразивными брусками // Вестник машиностроения. - 1973. - №6. - С.73 - 75.
4. Чеповецкий, П.Х. Основы финишной алмазной обработки. - Киев: Наукова думка, 1980.-468 с. 6.И. Маталин, А.А. Новые направления развития технологии чистовой обработки. - Киев: Техника, 1972. - 136 с.
5. Бабичев, А.П. Вибрационная обработка деталей. - М.: Машиностроение, 1974. - 136 с.
6. Козлов, Ю.С., Кузнецов, О.К., Тельнов, А.Ф. Очистка изделий в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1982. - 264 с.
7. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. - Киев: Наукова думка, 1979. - 244 с.
8. Малый патент ТJ 1361 МПК B24B 31/108; B24B 11/00. Опубл. 03.05.2022. Бюл. 177, 2022. Устройство для многодисковой центробежной абразивной обработки шариков / 1. Холов Ф.Б.(ТJ); Убайдуллоев А.Н. Мирзоалиев И. (TJ); Мирзоалиев А.И. (TJ); Амонов С.Т. (TJ); Ашурев К.Х (TJ).
9. Авт. свид. №1549728 (СССР), М.кл. B24B 31/108. Центробежная установка для объемной обработки деталей /С.С. Фасатуров. -Опубликован 15.03. 1990- Б.И. №10, 1983.
- 10.Гребенщиков И.В. Роль химии в процессных полированиях. Труды семинара по качеству поверхности. Ст.3. Изд-во АН СССР, М., 1957.

- 11.Авт.свид. №1093507(СССР), М.кл. В24В31/108. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей /А.А. Серегин, В.В.Рябов и Л.Ф. Борзина. – Опубликован 23.05. 1984 Б.И. №19.
- 12.Авт.свид. №1549728(СССР), М.кл. В24В31/08. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей /С.С. Фасатуров. –Опубликован 15.03. 1990 Б.И. №10.
13. Ходжаев Т.А., Мирзоалиев И.М., Мирзоалиев А.И., Убайдуллоев А.Н. Повышение эффективности процесса изготовления шаровидных изделий из самоцветных камней. - Душанбе ТТУ им. Академика М.С.Осими, 2020.- 125с.. ил.
- 14.Дудко П.Д. Методика повышения производительности доводки свободным абразивом. – М.: «Вестник машиностроения». 1960. №6.
- 15.Дунин-Барковский И.В., Карташова И.И. “Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости”. М., Машиностроение, 1978,- 232с.
- 16.Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. [Текст]: Н.В. Смирнов, И.В. Дунин - Барковский - М. Наука, Главе. ред. физ-мат. литературы, 1969, - 511с.
- 17.Есьман Г.А. Интенсификация процесса без элеваторной доводки шариков с помощью ультразвука: Автореф... канд. техн. наук. – Минск, 1984.
- 18.Есьман Г.А. Исследование процесса без элеваторной доводки шариков с помощью ультразвука: Автореф... канд. техн. наук. – Минск, 1984.
- 19.Иванов В.Н., Устинов Н.П., Ильин А.И. Исследование изнашивания деталей топливного насоса Д-50 и изыскание мероприятия по повышению работоспособности плунжерных пар. Сб. Трение и износ в машинах. М.: Изд-во А.Н. СССР. 1962. – с. 25-50.
- 20.Ильин А.И. Исследование работоспособности плунжерных пар тепловозных дизелей. Тр-ды МИИТ, вып. 141, 1961.
- 21.Кацев П.Г. Статические методы исследования режущего инструмента. М.: Машиностроение. 1974, 231 с. с ил.

- 22.Кедров С.М. Исследование механической доводки металлов «Качество поверхности деталей машин». Сб. №3. АН СССР, 1957.
- 23.Кищев Ю.В., Рябченко Н.Н. и др. Способ центробежной обработки деталей и устройство для его осуществления. Авт. свид. №1781009 А1 кл. В 24 В 31/08. Опубл. 15.12.92. Бюл. №46.
- 24.Ковалев А.А. Сущность процесса доводки свободными абразивами. Сб. Теория и практика алмазной обработки. М., НИИМАШ, 1964.
- 25.Колесник Н.В. Центробежно-планетарная машина для шлифования и полирования изделий. Авт. свид. №215753 кл. В 24 В 31/08. Опубл. 03.04.68 Бюл. №13.
- 26.Колесов Б.К. Способ обработки изделий. Авт. свид. №252114 кл. В 24 В 31/08. Опубл. 10.09.69.
- 27.Колкер М.Д. “Математический анализ точности механической обработки деталей”. Киев, Изд-во Техника, 1976,- 200с.
- 28.Корн Г. и Корн Т. “Справочник по математике” М., Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1973, - 832с.
- 29.Бетехтин А.Г., Курс минералогии (учебное пособие), Из-во «КДУ», М.,2008
- 30.Малый патент ТJ 1199 МПК B24B 31/108; B24B 11/00. Опубл. 08.07.2021. Бюл. 177, 2021. Устройства для центробежной абразивной обработки шариков / Имомов Н.Б.(ТJ); Мирзоалиев И. (TJ); Мирзоалиев А.И. (TJ); Мамадназарова М.С. (TJ); Амонов С.Т. (TJ); Назарзода Н. М. (TJ).
- 31.Авт.свид. №1093508(СССР), М.кл. В24В31/08. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей / Л.Ф. Косухин, Н.С. Федотова. –Опубликован 23.05. 1984 Б.И. №19.
- 32.А.с. 528180 СССР, кл. В24 В11/02. Устройство для доводки шариков/ Л. А. Олендер, К. Г. Щетникович, А. А. Кособуцкий и В. А. Хлебцевич/– №4034064/31-08; Заявлено 05.03.86; Опубл. 15.03.88, Бюл. №10.
- 33.Авт.свид. №992172 СССР, М.Кл. В24В 31/08. Способ абразивной центробежно-планетарной обработки деталей и устройство для его

осуществления/ И.Е. Бондаренко, С.И. Фишбейн, Р.А. Подтеребков, Е.И. Фишбейн. Опубл. 25.03.83, Бюл. №4.

34.А.с. 645818 СССР, кл. B29C37/02, B24B11/02. Устройство для доводки шариков/ С.А. Лобанкин СССР, –№4842378/05; Заявлено 12.04.90; Опубл. 23.02.92, Бюл. №7.

35.Малый патент ТJ 647 МПК B24B 31/00. Опубл. 09.12.2013. Бюл. 99,2014. Планетарно-центробежная установка для абразивной обработки заготовок из различных материалов / Мирзоалиев А.И.(ТJ); Мирзоалиев И(ТJ); Убайдуллоев А.Н.(ТJ); Иззатуллоев М.А. ТJ); Назарзода Н.М.(ТJ).

36.А.с. 973314 СССР, Р11М К з В24 В11/02 (23). Устройство для доводки шариков/Л.А. Олендер О.С. Мурков, М.Ф. Фридман и др.–№3213264/25-08; Заявлено 15.11.82; Опубл.15.11.1982г, Бюл. №42.

37.А.с. 2177870 СССР, В24В11/02. Устройство для обработки шариков/ В.Н. Тилипанов, А.П. Минаков, С.С. Акимов. – №2000101079/02; Заявлено 12.01.2000; Опубл. 10.01.2002, Бюл. №29.

38.А.с. 1006174 СССР, В24 В11/02. Устройство для обработки шариков/ И.П. Филонов, И.И. Дьяков. –№3296250/25-08; Заявлено 05.06.81; Опубл. 30.06.86, Бюл. №11.

39.Малый патент ТJ 355 МПК B24B 31/02. Опубл. 30.12.202. Бюл. №4. Способ центробежной абразивной обработки деталей тел вращения/ Мирзоалиев И(ТJ); Убайдуллоев А.Н.(ТJ).

40.А.с. 963819 СССР, М.Кл.з В24 В11/02. Устройство для обработки шариков/ И.П. Филонов, И.И. Дьяков, И.Н. Сущевич. –№3281608/25-08; Заявлено 17.03.81; Опубл. 07 10.82, Бюл. №37.

41.Патент РФ №2119859 В24В11/02. Устройство для обработки шариков/ А.А. Шепелев, Ю.Н. Малов, Ю.И. Шушпан и др. –№94033529/02; Заявлено 15.09.1994; Опубл. 10.10.1998, Бюл. №47.

42.А.с. 891356 СССР, Способ центробежной обработки шариков/ И.П. Филонов, В.В. Бабук. –№2847286/25-08; Заявлено 06.12.79; Опубл. 23.12.81, Бюл. №47.

- 43.А.с. 554137 СССР, М.Кл.2 В24 В11/02. Станок для обработки шариков / П.И. Ящерицын, Л.А. Олендер, И.П. Филонов и др.–№2151304-08; Заявлено 08.07.85; Опубл. 15.04.77, Бюл. №14
- 44.А.с. 679380 СССР, В24 В31/08. Устройство для центробежной абразивной обработки/ П.И. Ящерицын, Л.А. Олендер, И.П. Филонов и др. – №2440680/25-08; Заявлено 04.01.77; Опубл. 15.08.79, Бюл. №30.
- 45.Патент РФ №2031788 кл. В28D1/00 опублик. 27.03.1995.
- 46.Дж. Синкенкес. Руководство по обработке драгоценных и поделочных камней. Перевод с английского. Москва. «МИР» 1989г. 415 стр.
- 47.А.с. 617245 СССР, М.Кл В24 В11/02. Устройство для обработки шариков/П.И. Ящерицын, И.П. Филонов, А.П. Минаков и др. –№2409956/25-08; Заявлено 04.10.76; Опубл.30.07.78, Бюл. №28.
- 48.Авт.свид. №1093507 (СССР), М.кл. В 24 В 31/108 Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей / А.А. Серегин, В.В.Рябов и Л.Ф.Борзина -Опубл. 23.05.1984-Б.И.№19.
- 49.Авторское свид. СССР №1013220 кл. В 24 В 11/02 оп. 23.04.83. Бюл. №15
- 50.Патент РФ №2177870 кл. В24В11/02 опублик. 12.01.2005.
- 51.А.с.992172.СССР, МПКВ31/104. Способ абразивной центробежно-планетарной обработки деталей и устройство для его осуществления. [Текст] / И. Е. Бондаренко, С. И. Фишбейн, Р. А. Подтеребков [и др.]/ заявл. 02.03.1978 опубл. 30.01.83. Бюл. № 4
- 52.А.с.992172. СССР, МПКВ24В31/08. Способ абразивной центробежно-планетарной обработки деталей и устройство для его осуществления. [Текст] / И. Е. Бондаренко;С. И. Фишбейн; Р. А. Подтеребков. [и др.] / заявл.11.06.81. опубл.30.01.83. Бюл. № 4.
- 53.А.с. 1652044. СССР, МПК В24 В31/104. Центробежно-планетарная установка для абразивной обработки деталей. [Текст] / Е.С. Первушин, В.А. Дьячков, М.Ф. Кузьмин и Х.М. Муртазин. Заявл.17.07.89. Опубл.1991. Бюл. №20.

- 54.А.с. 452481. СССР, МПК В24 В31/08. Устройство для центробежной отделки изделий. [Текст] / В.М. Кузаконь, В.А. Анпилогов, А.П. Сергиев. - №1808605/25-8; заявл. 11.07.72; опубл. 05.12.74, Бюл. №45-2 с.
- 55.Патент №566714, СССР, МПК В24В31/02. Галтовочный барабан/ Д.Х. Аюкасов, В.П. Озеров и А.Н. Фокин; заявитель и патентообладатель Д.Х. Аюкасов, В.П. Озеров и А.Н. Фокин. №2141863; заявл. 06.06.75, опубл. 30.07.77. Бюл. №28
- 56.Патент №841925, СССР, МПК В24В11/02. Станок для обработки шариков/ И.П. Филонов, И.И. Дьяков; заявитель и патентообладатель Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт. №2752128/25-08; заявл. 13.04.79, опубл. 30.06.81. Бюл. №24.
- 57.Патент №683888, СССР, МПК В24В31/08. Устройство для центробежной отделки изделий/ П.П. Мерзляков, В.Н. Глебов и В.М. Кузаконь; заявитель и патентообладатель П.П. Мерзляков, В.Н. Глебов и В.М. Кузаконь. №2534653; заявл. 18.10.77, опубл. 05.09.79. Бюл. №33.
- 58.Патент №TJ 355, Республика Таджикистан, МПК 7В24В31/02, 31/10. Способ центробежной абразивной обработки деталей тел вращения / И.М. Мирзоалиев, А.Н. Убайдуллоев; заявитель и патентообладатель И.М. Мирзоалиев, А.Н. Убайдуллоев. № 01000691; заявл. 31.07.2001, опубл. 20.11.2002. Бюл. №2.
- 59.А.с. 231338 СССР, МПК В24в.Установка для центробежной абразивной обработки деталей в контейнерах [Текст] / Э.Б. Купчик; И.Я. Вахрашев; И.Е. Бурштейн и др.№ 1186234/25-8; Заявл.25.15.1967; Опубл.15.04.1968. Бюл. № 60.А.с. 68612 СССР, МПК В24 В31/06 Центробежно-вибрационная установка [Текст] / Н.И. Бондарь; В.М. Мороз. № 709343. Заявл. 123.278. Опубл.15.61.80. Бюл. №2.
- 61.А.с. 4136693 СССР, МПК В24 В31/108.Планетарно-центробежная установка для абразивной обработки деталей [Текст] / А.П.Германов; Б. А Германова. №1419866А1. Заявл.21.10.1986 Опубл. 30.08.88. Бюл. №32.

62. А.с. 1146180 ССР, МПК В24 В31/027. Устройство для планетарно-центробежной обработки деталей [Текст] / В.П. Овочкин, М.К. Мерзляков, В.А. Галашев, [и др.] №458104. заявл. опубл. 23.03.1985. Бюл. №11
63. Патент № ТJ 647 Республика Таджикистан, МПК (2014) B24 B31/00. Планетарно-центробежная установка для абразивной обработки заготовок из различных материалов / И.М. Мирзоалиев, А.И. Мирзоалиев, Т.А. Ходжаев [и др.]. - №1300823; заявл. 09.12.2013, опубл. 10.11.2014/Патентный вестник - 2014. №99- С.13.
64. Патент № ТJ 648, Республика Таджикистан, МПК (2014) B24 B1/00. Способ абразивной центробежно-планетарной обработки заготовок из различных материалов / И.М. Мирзоалиев, А.И. Мирзоалиев, Т.А. Ходжаев [и др.]. - №1300824; заявл. 09.12.2016, опубл. 10.11.2014/Патентный вестник. - 2014. №99- С.14.
65. Патент № ТJ 649, Республика Таджикистан, МПК (2014) B24 B1/00. Устройство для центробежной абразивной обработки сферических поверхностей изделий из самоцветных камней / Т.А. Ходжаев, И.М. Мирзоалиев, А.И. Мирзоалиев [и др.]. №1300825; заявл. 09.12.2015. опубл. 10.11.2014// Бюллетень. - №99 -С.15.
66. Патент № ТJ 650, Республика Таджикистан, МПК (2014) B24 B1/00. Устройство для центробежной абразивной обработки сферических поверхностей изделий из самоцветных камней. / Ходжаев Т.А., А.И. Мирзоалиев, И.М. Мирзоалиев, Н.А. Убайдуллоев [и др.]. - №1300826; заявл. 09.12.2016. опубл. 10.11.2014// Бюллетень. - №99 -С.16.
67. А.с.231338 С С С Р, МПК В 24b. Установка для центробежной абразивной обработки деталей в контейнерах [Текст] / Э.Б. Купчик; И.Я. Вахрашев; И.Е. Бурштейн и др. № 1186234/25-8; Заявл. 25.15.1967; Опубл. 15.04.1968. Бюл. № 35
68. А.с.68612 ССР, МПК В 24 В 31/06 Центробежно-вибрационная установка [Текст] / Н.И. Бондарь; В.М. Мороз. № 709343. Заявл. 123.278. Опубл. 15.61.80. Бюл. №2.

- 69.А.с.211747 СССР, МПКВ24В31/08. Шлифовально – полировальный станок [Текст] / Ю.И. Гавридов; А.А.Кудрявцев; А.М.Зарин. №112478; Заявл.11.06.53; Опубл. 14.07.55. Бюл. №17.
- 70.А.с.4136693 СССР, МПК В24В 31/108.Планетарно-центробежная установка для абразивной обработки деталей [Текст] / А.П.Германов; Б.А Германова. №1419866А1. Заявл.21.10.1986 Опубл. 30.08.88. Бюл. №32.
- 71.А.с.1146180 СССР, МПК В24В 31/027. Устройство для планетарно-центробежной обработки деталей [Текст] / В.П.Овечкин, М.К.Мерзляков, В.А. Галашев, [и др.] №458104. заявл. опубл. 23.03.1985. Бюл. №11
- 72.Синкенкес Дж. Руководство по обработке драгоценных и поделочных камней. [Текст] / Дж. Синкенкес // Перевод с английского. Москва. «МИР» 1989г. 415 стр.
- 73.А.с. 302225 СССР,МПК В24В 31/023. Галтовочный барабан консольного типа [Текст] / В. И. Баранник, П. П. Клименко, А. И. Кабанов, В. А. Кондриков, В. Т. Коваленко и Ю. А. Гуревич. №1388129/25-8. Заявл.12.08.69. Опубл. 01.01.1971 Бюл.№15
- 74.Кулаков Ю.М. Отделочно-зачистная обработка деталей [Текст]: Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков–М., Машиностроение, 1979.-216с.
- 75.Дудко П.Д. Методика повышения производительности доводки металлов свободным абразивом [Текст]: Вестник машиностроения/П.Д.Дудко// №6,1980, с71-73
- 76.Кашук В.А. Справочник шлифовщика. [Текст]:В.А.Кашук, А.Б. Верещагин - М.: Машиностроение, 1988.-480с.
- 77.Сухарев В.М. Двустороннее шлифование [Текст]: В.М.Сухарев, А. С Денисов. - Техника, 1977.-80с.
- 78.Лоскутов В.В. Шлифование металлов [Текст]: В.В. Лоскутов.-М.: Машиностроение, 1985.-256с.
- 79.Луговой В.П. Исследование процессов доводки шариков в поле ультразвуковых колебаний. [Текст]: Автореф.дис... канд. техн. наук: 05.02.07/ В.П. Луговой. - Минск. 1980.-20с.

- 80.А.с. 2551658 СССР, МПКВ24В 1/00, В24В 5/18. Способы бесцентровой доводки наружных цилиндрических поверхностей деталей [Текст]/Н.Т.Лукин; В.И. Лысенко; М.Н. Иванов; и А.М. Липатов. №814663.заявл. 12.12.1977 Опубл. 23.03.81. Бюл. №11.
- 81.Орлов П.Н. Алмазно-абразивная доводка деталей. [Текст]: П.Н. Орлов М.: ВНИИМАШ, серия С-Х-Ч, 1972, -198с.ил.
- 82.Поносов П.П. Исследование физической сущности процесса плоской притирки при непрерывной подаче абразивной эмульсии. [Текст]/П.П. Поносов // Труды Уральского политехнического института им. С.М. Кирова. Сб. 80. Вопросы технологии машиностроения. 1959.
- 83.Беляев З.С. Механическое притирание поверхностей. [Текст]/ З.С. Беляев «Вестник машиностроения» №8, 1952.
- 84.Дудко П.Д. Исследование процесса доводки стальных цилиндрических деталей свободным абразивом с осцилирующим движением притира. [Текст]: Автореф... канд. техн. наук. 05.03.01./ П.Д. Дудко.– Харьков, 1969. – 20 с.
- 85.Лурье Г.Б. Основы технологии абразивной доводочно-притирочной обработки. [Текст]: Г.Б. Лурье В.В. Масловский- М., "Высшая школа", 1973.
- 86.Шегал М.И. Доводка измерительных инструментов. [Текст] / М.И.Шегал М: Машгиз,1947.
- 87.Гребенщиков И.В. Роль химии в процессных полированиях. [Текст] / И.В Гребенщиков. Труды семинара по качеству поверхности. Ст.3. Изд-во АН СССР, М., 1957.
- 88.Лозовский В.Н. Диагностика авиационных топливных и гидравлических агрегатов. [Текст] / В.Н. Лозовский М.: Транспорт, 1979.-295с.
- 89.Лозовский В.Н. Надежность и долговечность золотников плунжерных пар. [Текст] / В.Н. Лозовский. М.: Машиностроение. 1971.-232с.
- 90.Мишин А.А. Долговечность двигателей. [Текст] / А.А. Мишин.-Л.: Машиностроение, 1966.-100с.

- 91.Глазунов А.И. Экспериментальное и теоретическое решение технологической проблемы точного изготовления плунжеров для селективной сборки. [Текст]: Афтореф...канд. техн. Наук. 05.03.01./ А.И. Глазунов М., 1960.-20с.
- 92.Глазунов А.И. Кинематика и динамика процесса притирки наружных цилиндрических поверхностей. [Текст] / А.И. Глазунов, А.Т. Полецкий. Вестник машиностроения №2. 1961.
- 93.Богомолов Н.И. Основные процессы взаимодействия абразива и металла. [Текст]: Афтореф...д-ра техн. наук. 05.03.01./ Н.И. Богомолов.– Киев.1967.- 18с.
- 94.Семибрятов М.Н, Методика кинематической обработки стекла на конвейерах оптического приборостроения. [Текст]/ М.Н. Семибрятов, Р.Я, Шотчак, Сб,ст.№103, Оборонгиз, М 1981.
- 95.Быкадорова, О. Г. Повышение эффективности шлифования путем управления процессом взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла. [Текст]: Афтореф...канд. техн. Наук. 05.03.01. О. Г. Быкадорова - Волгоград.2005.-14с
- 96.Дудко П.Д. Исследование процесса доводки стальных цилиндрических деталей свободным абразивом с осциллирующим движением притира. [Текст]: Дис.канд. техн. наук, 05.03.01/ П.Д. Дудко.- Харьков: 1970. – 300 с.
- 97.Кедров С.М. Исследование механической доводки металлов в количестве поверхности деталей машин. [Текст]/ С.М.Кедров М,Издательство АНСССД,1957, с.110-140.
- 98.Кренень З.И. Выбор оптимальных условий абразивной доводки металлов. [Текст]/ З.И.Кренень. Вестник машиностроения, 1968, №5-с48-49.
- 99.Васьков В.И. Качество поверхности изделий из вольфрама при доводке абразивными и алмазными микропорошками. [Текст] / В.И. Васьков «Труды Северо-Кавказского горнометаллургического института». Вып. 23. 1968.
100. А.с.1313668 ССР, МПК В24В 31/108. Центробежная установка для абразивной поверхностной обработки заготовок. [Текст] / А.В. Гришневич;

Ю.К. Братушка. №131368 А1 кл. В24 31/108. Заявл.12.12.1985. Опубл. 30.05.87. Бюл. №20

101. А.с.1781009.СССР, МПКВ 24 В 31/108.Способ центробежной обработки деталей и устройство для его осуществления. [Текст] / Ю.В.Кишин; Н.Н. Рябченко. Заявл.11.08.90. Опубл. 15.12.92. Бюл. №46.
102. А.с.468769 СССР, МПКВ24В 1/08. Способ обработки изделий. [Текст] / Б.К. Колесов. №252114. Заявлено 10.07.72 Опубл. 30.04.75. бюл.№ 16.
103. А.с.11554227. СССР,МПКВ24в-31/108. Центробежная абразивная обработка деталей. [Текст] / В.П. Овечкин; В.А. Галашев. А кл. Заявл.17.11.83. Опубл. 15.05.85. Бюл. №18.
104. А.с.118964А СССР, МПК В 24 В 31/108. Устройство для центробежной обработки деталей. [Текст] / В.П.Овечкин; Г.Г.Мерзлюков.Заявл.12.04.83 Опубл.07.11.85. Бюл. №41.
105. А.с.1220754 СССР, МПК В 24 В31 /108.Устройство для центробежной обработки. [Текст] / А.М. Расолько; А.Д. Пашин; А.С. Сай. А.Заявл.17.02.84 Опубл. 30.03.86. Бюл. №12.
106. А.с.1407773 СССР, МПКВ24В31/108. Способ центробежной абразивной обработки поверхностей деталей. [Текст] / В.О. Трилскш; Н.А. Журавлев. А1.Заявл.9.05.85. Опубл. 07.07.88. Бюл. №25.
107. А.с.1379061.СССР, МПК В 24 В 31/108. Устройство для центробежной обработки. [Текст] / С.С.Фасотуров. А1.Заявл.14.05.85. Опубл. 07.03.88. Бюл. №9.
108. А.с.№1315256.СССР, МПК В24 В 31/108. Устройство для центробежной обработки. [Текст] / С.С. Фасотуров.Заявл.21.11.85. Опубл. 07.06.87. Бюл. №21.
109. А.с.№1781010. МПК В24В 31/108. Центробежное устройство. [Текст] / Р.М.Халимулин; Ф.С. Юнусов; Р.Р. Исмаилов. Заявл.28.07.90. Опубл. 15.12.92. Бюл. №46.

110. А.с.573326.СССР, МПК В24В 31/08. Установка для центробежной абразивной обработки деталей в контейнерах. [Текст] / С.Г. Кадаян, К.А. Миндоян, Э.К. Акопян. Заявл. Опубл. 25.09.77. Бюл.№ 35.
111. А.с.992172. СССР, МПКВ24В 31/08. Способ абразивной центробежно-планетарной обработки деталей и устройство для его осуществления [Текст] / И.Е.Бондаренко; С.И.Фишбейн; Р.А.Подтеребков. [и др.] Заявл.18.03.81. Опубл. 1983. Бюл.№4,
112. Способ абразивной центробежно-планетарной обработки деталей и устройство для его осуществления» по авт. свид. №992172.
113. А.с.1419866А1 СССР, МПК.В24В 31/108.Планетарно - центробежная установка для абразивной обработки деталей. [Текст] / А.П. Германов; Б.А.Германова;. Заявл.22.03.86 Опубл. 30.08.88. Бюл. №32.
114. А.с.215753 СССР, МПК В24В 31/08. Центробежно-планетарная машина для шлифования и полирования изделий. [Текст] / Н.В. Колесник. Заявл.21.07.66. Опубл. 03.04.1968. Бюл. №13.
115. Патент № TJ 648 Таджикистан. МПК (2014), В24В1/00. Способ абразивной центробежно-планетарной обработки заготовок из различных материалов [Текст] / А.И. Мирзоалиев; И.М. Мирзоалиев; Т.А Ходжаев [и др].-№1300824 ; заявл. 09.12.2016. опубл.10.11.2014, бюл.-№99-с.14
116. Пат. № TJ 647 Таджикистан.МПК(2014), В24В31/00. Планетарно-центробежная установка для абразивной обработки заготовок из различных материалов [Текст] / А.И. Мирзоалиев; И.М. Мирзоалиев; Т.А Ходжаев [и др].- №1300823 ; заявл. 09.12.2013 опубл.10.11.2014, бюл. №99-с.13
117. А.с.709343. СССР, МПК В24В 31/08. Центробежно-вибрационная установка. [Текст] / Н.Н.Бондарь; В.М. Заявл.19.02.78. Опубл. 15.01.80. Бюл. №2.
118. А.с.818833. СССР, МПК 4в 31/08. Вибро-центробежная машина для отдельных деталей. [Текст] / А.П. Субач; А.Я. Пап; Я.А.Алнис. Заявл.11.07.79. Опубл.07.08.81. Бюл. №13.

119. Васьков В.И. Качество поверхности изделий из вольфрама при доводке абразивными и алмазными микропорошками. [Текст] / В.И. Васьков. Труды Северо-Кавказского горнometаллургического института. Вып. 23. 1968.
120. А.с.532513.СССР,МПК В24В 31/08. Виброцентробежная установка для обработки деталей.[Текст] /. И.И.Субач; Я.А. Думбравс. №2633928/25-08; заяв. 26.09.75. опубл. 25.10.76, Бюл. №39.
121. А.с.4605050. СССР,МПК В 24 В 31/02.Галтовочный барабан.[Текст] / В.А. Грачев; Н.А. Горелов; Р.В.Васин. №4605050/08, №1650398А.1 заявл. 10.10.88,опубл. 23.05.91, Бюл.№19
122. А.с.4774844/08 СССР, МПК В 24 В 31/02. Галтовочная установка. [Текст] / В.А. Окунь; В.С. Тимошенко; В.Р. Пищиков. №1743819 А.1 заявл. 27.12.89; опубл.30.06.92, Бюл.№24.
123. А.с. 1582503 СССР, МПК5В24В 31/104. Способ абразивной обработки деталей и устройство для его осуществления. [Текст] / А.П.Сергиев №4421500/31-08; заявл. 07.05.88. 3 с.
124. А.с.967779.СССР, МПК24В31/08. Способ абразивной планетарной обработки деталей. [Текст] / Заявл.14.06.80. Опубл.23.10.82. Бюл. № 39
125. А.с.992172. СССР, МПКВ24В31/08. Способ абразивной центробежно-планетарной обработки деталей и устройство для его осуществления. [Текст] / И. Е. Бондаренко;С. И. Фишбейн; Р. А. Подтеребков. [и др.] / заявл.11.06.81. опубл.30.01.83. Бюл. № 4.
126. А.с.1652044А1. СССР, МПК В24В31/08. Центробежно-планетарная установка для абразивной обработки деталей. [Текст] / заявл.11.05.88. опубл.30.05.91. Бюл. №20.
127. Патент РФ №2481186 В24В11/10. Устройство для сферодоводки сферы/ В.В.Бернадский; заявл. 10. 10. 2011; опубл. 10.05.2013.
128. А.с. 522949 СССР, М. Кл. В24 В11/00. Устройство для доводки шариков/ Г.С. Дробашевский, П.И. Ящерицын, Л.А. Олендер и др. №2061308/08 (51); Заявлено 17.09.74; Опубл. 30.07.76, Бюл. №28.

129. Патент РФ № 1510250 от 10.12.1995г. Способ шлифования шариков/ И.А. Коробченко, Л.Н. Васин заявл. 10. 01. 1994; опубл. 11.02.1995.
130. А.с.1329954 СССР, МПК B24B 31/104 Способ центробежно - планетарной обработки деталей. [Текст] / Н. И. Тимохин. 1329954A1.заявл.21.03.89. опубл.15.08.87. Бюл. № 30.
131. А.с.1551334.СССР, МПК B24B31/02. Планетарный центробежный станок для обработки деталей свободным абразивом. [Текст] / А. П. Бурмистенков; И. В. Панасюк. 1551334A заявл. 28.01.1988. опубл.23.03.90. Бюл. № 11. (72)
132. Кремня З.И. Технология обработки абразивным и алмазным инструментом. [Текст] / З.И. Кремня. - М. Машиностроение 1989 185 с.
133. Дунин-Барковский И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости. [Текст]: И.В. Дунин-Барковский, И.И. Карташова -М.: Машиностроение, 1978. - 232с.
134. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. [Текст]: Н.В. Смирнов, И.В. Дунин - Барковский - М. Наука, Главе. ред. физ-мат. литературы, 1969, - 511с.
135. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. Ю.П. Адлер М.: «Металлургия» 1969. – 155 с.
136. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. [Текст]: Ю.П. Адлер, Е.П. Маркова, Ю. В. Грановский – М., Наука. 1970. – 283с.
137. Большев Л.Н.Таблицы математической статистики. [Текст]: Л.Н.Большев, Н.В.Смирнов. М.: Наука. 1965-474с.
138. Кацев П.Г. Статические методы исследования режущего инструмента. [Текст] / П.Г. Кацев. М.:Машиностроение. 1974, 231 с.
139. Колкер М.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. [Текст] / М.Д.Колкер. Киев, Изд-во Техника, 1976,- 200с.
140. Протодяконов М.М. Методика рационального планирования экспериментов. [Текст]: М.М. Протодяконов, Р.И.Тедер. М.: Наука, 1970, - 71с.

141. Пустыльник Е.И.Статистические методы анализа и обработка наблюдений. [Текст] / Е.И.Пустыльник. М.,1968, -288с.
142. Солонин И.С. Математическая статистика в технология машиностроения. [Текст] / И.С. Солонин. М.: Машиностроение. 1972. – 216с.
143. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений [Текст]: Н.В.Смирнов, И.В.Дунин – Барковский. М:- Наука, Главе. ред. физ-мат. литературы, 1969, - 511с
144. А.с.1033296 СССР, МПК В24В 31/08. Установка для центробежной обработки деталей. [Текст]/В.Н. Глебов, П.П. Мерзляков, А. А. Бусоргина. №3421974/25-08; заявл. 14.04.82; опубл. 07.08.83, Бюл. № 29-3 с.
145. А.с.4796396 СССР, МПКВ24В31/104.Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей. [Текст] / А.А.Серегин, В.В.Рябови, Л.Ф.Борзина. SU1093507A. заявл.17.09.82. опубл.23.05.84. Бюл. № 19.
146. А.с.1068272.СССР, МПКВ24В31/08. Устройство для центробежной обработки деталей. [Текст] / П. П. Мерзляков,и В. П. Овечкин.№62Г.924.7(088.8) заявл.9.02.82. опубл.23.05.84. Бюл.№3.
147. А.с. 986746.СССР, МПК В24В31/08. Устройство для центробежной абразивной обработки изделий типа колец. / А.Н.Мартынов, И.Б.Колтунов, Е.Э.Зверовщиков [и др]. заявл.11.04.81. опубл.07.01.83, Бюл. № 1
148. А.с.656816. СССР, МПК В24В31/08. Устройство для абразивной центробежной обработки деталей. [Текст] / Д.Х. Аюкасов и И.Х. Аюкасов №1032664А заявл. 0.2.03.78. опубл.07.04.84. Бюл. № 13.
149. А.с.1013233. СССР, МПКВ24В31/08. Способ центробежной абразивной обработки деталей. [Текст] / К.А. Миндоян. №3304652. Заявл.18.06.81. Опубл.23.04.83. Бюл. № 15.
150. А.с. 1189664 СССР, МПК В24В 31/108.Устройство для центробежной абразивной обработки. [Текст] / П.П. Овечкин. В.П. Мерзляков, Г.Г. Ренев. № 452481. заявл.14.06.82. опубл. 7.11.85, Бюл. № 41
151. А.с. 1509234СССР, МПК 4 В24 В 31/104.Устройство для центробежной абразивной обработки деталей. [Текст] / А.П. Германов, Е.А. Германова,

В.М. Кузаконь.-№ 4319927/40-08; заявл. 21.10.87; опубл.23.09.89, Бюл. № №35.-3 с

152. А.с. 1652044. СССР МПК В24 В 31/104. Центробежно-планетарная установка для абразивной обработки деталей. [Текст] / Е.С. Первушин, В.А. Дьячков, М.Ф. Кузьмин и Х.М. Муртазин. Заявл.17.07.89. Опубл.1991. Бюл. №20.
153. А.с. 452481. СССР МПК В24 В 31/08. Устройство для центробежной отделки изделий.[Текст] / В.М. Кузаконь, В.А. Анпилогов, А.П. Сергиев. - №1808605/25-8; заявл. 11.07.72; опубл. 05.12.74, Бюл. №45-2 с.
154. Экономика машиностроительного производства.[Текст] / [Ю.А. Абрамов, И.Э. Берзинь, Н.Н. Застрожнова и др.].Учеб. Для машиностр. Спец. Вузов,- М.: Высш. шк., 1988.- 304 с.
155. А.с. 865635 СССР, МПК В24В 31/08. Центробежно-вибрационная установка. [Текст] / Н.И. Бондарь; В.М. Мороз. № 709343.заявл. 05.09.79 Опубл. 23.09.81. Бюл. № 35
156. А.с. 532513. СССР, МПКВ24В 31/08 Виброцентробежная установка для обработки деталей. [Текст] / А.П. Субач, И.И. Думбравс, №633928/25-08. Заявл.27.09.75. Опубл. 25.10.76. Бюл. № 39.
157. Гамрат-Курек П.И. Выбор варианта изготовления изделий и коэффициента затрат. [Текст]: П.И.Гамрат-Курек, К.Ф.Иванов. – М., Машиностроение, 1975.-133с.
158. Дунин-Барковский И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости. [Текст]: / И.В., Дунин-Барковский, И.И. Карташова. - М.: Машиностроение,1978,- 232с.

# ПЕРЕЧЕНЬ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**А) Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах из перечня ВАК при Президенте Республики Таджикистан:**

[1-А]. **Холов Ф.Б.** Применение центробежной абразивной обработки при изготовлении изделий из полудрагоценных и поделочных камней // Политехнический вестник. Серия: Серия Инженерные исследования. № 2 (70) 2025 – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2025. – С.67-78, ISSN 2520-2227.

[2-А]. **Холов Ф.Б.** Многоинструментальный станок для обработки шариков **Холов Ф.Б** // Наука и инновация. Серия: Серия геологических и технических наук. №4., 2024. - Душанбе: Таджикский национальный университет, 2024, С.54-62, ISSN 2664-1534.

[3-А]. **Холов Ф.Б.** Влияние режимов резания на производительность процесса центробежной абразивной обработки шариков на станке с направляющими пластинами **Холов Ф.Б.**, Имомов Н.Б., Мирзоалиев И.М., Гулов С.С. // Наука и инновация. Серия: Серия геологических и технических наук. №1., 2024. - Душанбе: Таджикский национальный университет, 2024.- С.66-74, ISSN 2664-1534.

[4-А]. **Холов Ф.Б.** Экспериментальное исследование процесса центробежной абразивной обработки шариков из самоцветных камней на станке с направляющими пластинами - Имомов Н.Б., Мирзоалиев И., **Холов Ф.Б.** // Вестник Таджикского технологического университета. №4/1 (55)., 2023. - Душанбе 2023. С.17-24, ISSN 2707-8000.

[5-А]. **Холов Ф.Б.** Исследование процесса многодисковой центробежной абразивной обработки шариков из самоцветных камней **Холов Ф.Б.** // Наука и инновация. Серия: Серия геологических и технических наук. №3., 2022. - Душанбе: Таджикский национальный университет, 2022.- С.77-84, ISSN 2664-1534.

[6-А]. **Холов Ф.Б.** Перспектива галтовки самоцветных камней, для развития формообразования и обеспечения качества продукции Бобоев Д.М., Мирзоалиев А.И. Амонов С.Т., **Холов Ф.Б.** // Политехнический вестник. Серия: Серия Инженерные исследования. № 2 (58) 2022 – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2022. – С.100-106, ISSN 2520-2227.

### **Б) Изобретения по теме диссертации**

[7-А]. **Холов Ф.Б.** Малый патент Республики Таджикистан № TJ 1589. Галтовочный барабан // Амонов С.Т. (TJ); Мирзоалиев И. (TJ); Мирзоалиев А.И. (TJ); **Холов Ф.Б. (TJ)**; Имомов Н. (TJ)., Ашурев К.Х. (TJ). // Республика Таджикистан. Патентное ведомство. На изобретение выдан малый патент № TJ 1589. Душанбе: 2025.: Заявление №2401986.

[8-А]. **Холов Ф.Б.** Малый патент Республики Таджикистан № TJ 1361. Устройство для многодисковой центробежной абразивной обработки шариков // **Холов Ф.Б. (TJ)**; Убайдуллоев А.Н. (TJ); Мирзоалиев И. (TJ); Мирзоалиев А.И. (TJ); Амонов С.Т. (TJ); Маҳмадуллоев Р.З. (TJ)., Ашурев К.Х. (TJ). // Республика Таджикистан. Патентное ведомство. На изобретение выдан малый патент № TJ 1361. Душанбе: 2023.: Заявление №2201668.

### **В) Статьи, опубликованные в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU**

[9-А]. **Холов Ф.Б.** Влияние режимов обработки на исправление формы шаровидных изделий из самоцветных камней при обработке на станке с направляющими пластинами - Имомов Н.Б., Мирзоалиев И., **Холов Ф. Б.** // Политехнический вестник. Серия: Серия Техника и Общество. № 3 (3), 2023 – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2023.

[10-А]. **Холов Ф.Б.** Исследование возможности обеспечение равномерности изнашивания инструмента при обработке на центробежном станке с направляющими пластинами - Имомов Н.Б., Мирзоалиев И., **Холов Ф. Б.** // Политехнический вестник. Серия: Серия Техника и Общество. № 2 (2), 2023 – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2023.

[11-А]. **Холов Ф.Б.** Экспериментальное исследование процесса многодисковой центробежной абразивной обработки шариков из самоцветных камней - **Холов Ф. Б.**, Мирзоалиев И., Имомов Н.Б. // Политехнический вестник. Серия: Серия Техника и Общество. № 1 (1), 2023 – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2023. – С.4-11.

[12-А]. **Холов Ф.Б.** Планетарно-центробежная обработка заготовок из самоцветных камней - Мирзоалиев И., Мирзоалиев А. И., Ходжаев Т. А., Имомов Н.Б, **Холов Ф.Б.** // Международный научный журнал «Научные горизонты», № 8(60) | 2022., ISSN 2587-618X., С.51-61.

[13-А]. **Холов Ф.Б.** Барабанная галтовка заготовок из самоцветных камней - Мирзоалиев И., Мирзоалиев А. И., Орифова Х.Ф., **Холов Ф.Б.**, Мамадназарова М. С. // Международный научный журнал «Научные горизонты», № 8(60) | 2022, ISSN 2587-618X., С.62-71.

### **Г) Статьи, опубликованные в материалах конференции**

[14-А]. **Холов Ф.Б.** Обработка самоцветных камней на галтовочном барабане усовершенствованной конструкции - Амонов С. Т.1, **Холов Ф. Б.1**, Эмомов Н. Б.1, Луговой В. П.2, Мирзоалиев И.1 // Материалы 17-й Международной научно-технической конференции: Приборостроение-2024., Белорусский национальный технический университет, 26–29 ноября 2024 года, С.110 -111, Минск, Республика Беларусь.

[15-А]. **Холов Ф.Б.** Исследование процесса галтовки самоцветных и поделочных камней на многодисковом центробежном станке - **Холов Ф.Б.**, Мирзоалиев И., Ашурев К.Х., Амонов С.Т. // Международную научно-практическую конференцию на тему «Современные задачи машиностроительной промышленности», посвящённую 50-летию образования кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» и ускоренной индустриализации Республики Таджикистан как четвёртой цели национальной стратегии. 31 октября 2024г. - Душанбе -2024.

[16-А]. **Холов Ф.Б.** Изготовление шариков из самоцветных камней на многоинструментальном центробежном станке - Убайдуллоев А. Н., Мирзоалиев

И., Мирзоалиев А. И., **Холов Ф. Б.**, Амонов С. Т. // Машиностроение и техносфера XXI века Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции, г. Севастополь, 16 – 22 сентября 2024 г. С. 366-370. Донецк 2024.

[17-А]. **Холов Ф.Б.** Исследование динамики процесса формообразование шариков при центробежной абразивной обработке - И. Мирзоалиев, Х.Ф. Орифова, Т.А. Ходжаев, **Ф.Б. Холов** // Международную научно-практическую конференцию наука – основа инновационного развития. 18-19 апреля. - Душанбе -2024.

[18-А]. **Холов Ф.Б.** Исследование шероховатости поверхности при обработке на центробежном станке с направляющими пластинами - Н.Б. Имомов, И.М. Мирзоалиев, **Ф.Б. Холов**, С.Т. Амонов // Международную научно-практическую конференцию наука – основа инновационного развития. 18-19 апреля - ДУШАНБЕ -2024.

[19-А]. **Холов Ф.Б.** Влияние количества абразива на производительность обработки при галтовке Мирзоалиев А.И., Мамадназарова М.С., **Холов Ф.Б.**, Имомов Н.Б. // Материалы международной научно - практической конференции «Современные проблемы точных наук в подготовке высококвалифицированных кадров для горно - металлургической отрасли страны» посвящённой «Двадцатилетию изучение и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования» -2020-2040 гг. С.12-14. Бустон 2023.

[20-А]. **Холов Ф.Б.** Устройство для многодисковой центробежной абразивной обработки шариков - **Холов Ф.Б.1**, Луговой В.П.2, Мирзоалиев И.1. // Материалы 15-й Международной научно-технической конференции: Приборостроение-2022., Белорусский национальный технический университет, 16–18 ноября 2022 года Минск, Республика Беларусь., С.275-276.

[21-А]. **Холов Ф.Б.** Способ центробежной абразивной обработки - **Холов Б. Ф.**, Убайдуллаев А.Н. // Международная молодёжная Научная конференция «новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование» (россия, москва, 21-24 апреля 2020 г.) С.210-214, УДК 532.528.6.

[22-А]. **Холов Ф.Б.** Центробежная абразивная обработка шариков -

Ашурев Қ.Х., **Холов Ф.Б.**, Ҳақёров И. // Материалы международной научно-практической конференции (15 - 16 октября 2021 года) ЧАСТЬ 1. - Душанбе 2021., С.124-128.

[23-А]. **Холов Ф.Б.** Центробежно ротационная обработка поверхностей деталей - **Холов Ф.Б.**, Ашурев Қ.Х., Зайниддинов Д.Р. // Материалы республиканской научно – практической конференции: «Конкурентные преимущества национальной экономики на пути к новой модели экономического роста» Технологический университет Таджикистана- Душанбе (24-25 апреля 2020 г), часть 1, С.185-187.

[24-А]. **Холов Ф.Б.** Разработка инструментов для центробежной абразивной обработки с гальваническим покрытием - Убайдуллаев А.Н., **Холов Ф.Б.** // Материалы международной научно – практической конференции: «Энергетика региона: состояние и перспективы развития» / Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими - Душанбе: «Промэкспо», 2019.- С. 178-183, часть 2.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Графики зависимости производительности от продолжительности обработки

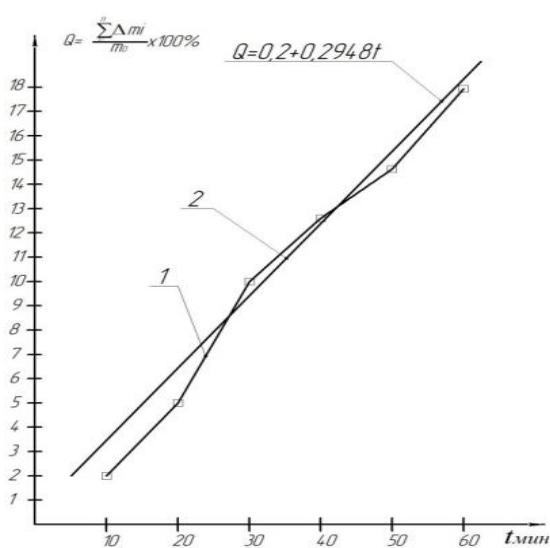


Рис.1. График зависимости производительности от времени при сухой обработке офита; Условия проведения эксперимента:  
 $V=7,85\text{м/сек}$  ( $n=600\text{об/мин}$ )

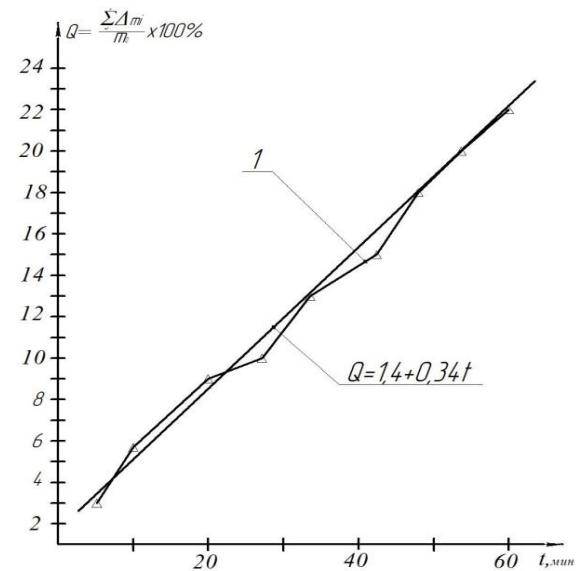


Рис.3. График зависимости производительности от времени при обработке офита в жидкой среде. Условия проведения эксперимента:  
 $V=7,85\text{м/сек}$  ( $n=600\text{об/мин}$ ).

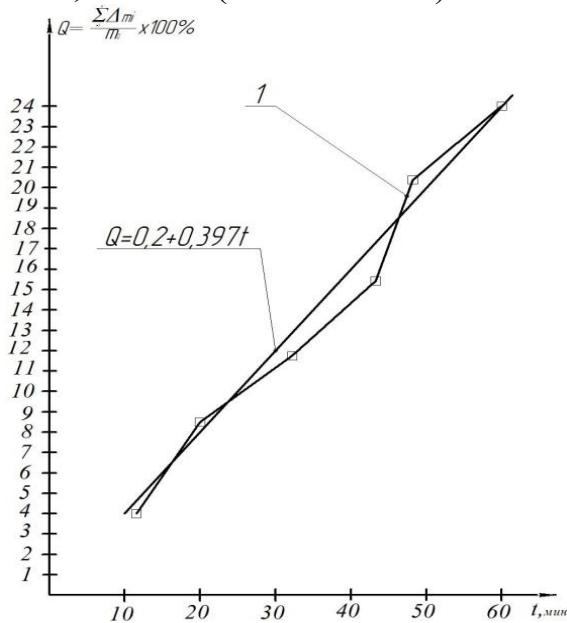


Рис.2. График зависимости производительности от времени при сухой обработке офита; Условия проведения эксперимента:  $V=13,08\text{м/сек}$  ( $n=1000\text{об/мин}$ )

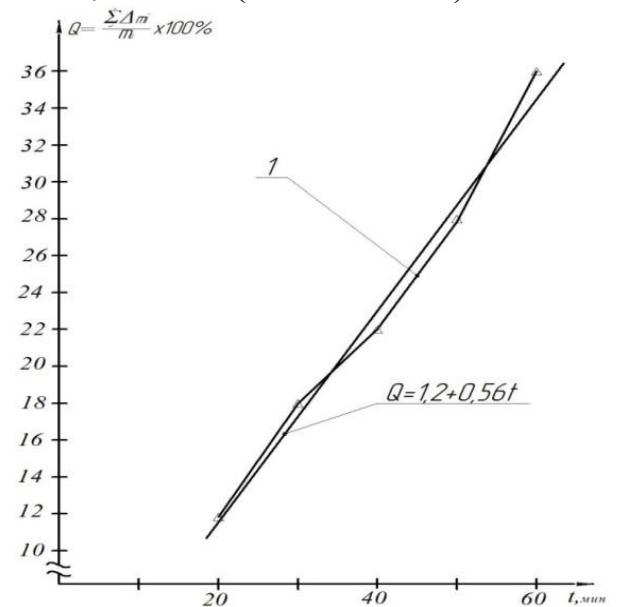


Рис. 4. График зависимости производительности от времени при обработке офита в жидкой среде. Условия проведения эксперимента:  
 $V=13,08\text{м/сек}$  ( $n=1000\text{об/мин}$ )

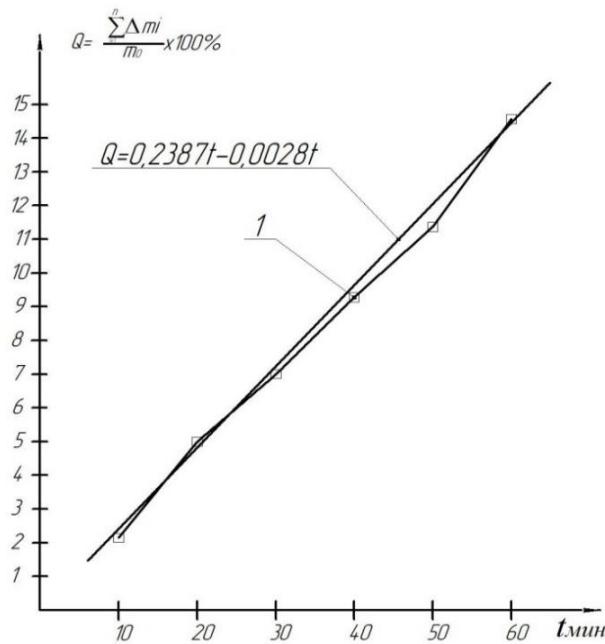


Рис.5. График зависимости производительности от времени при сухой обработке лазурита. Условия проведения эксперимента:  $V=7,85\text{м/сек}$  ( $n=600\text{об/мин}$ ).

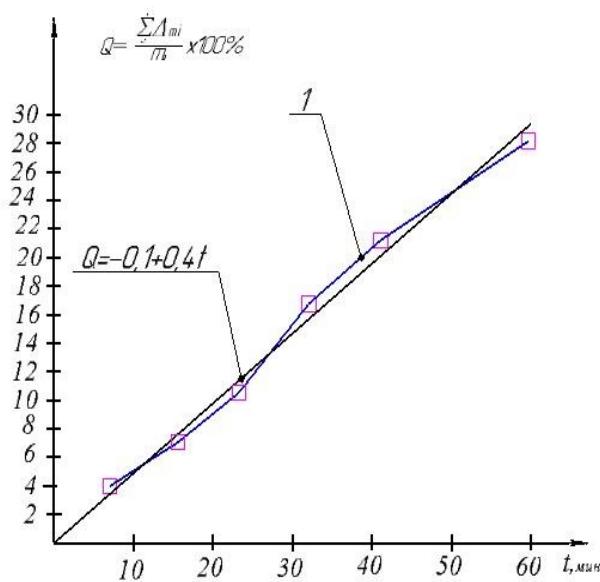


Рис.6. График зависимости производительности от времени при сухой обработке лазурита. Условия проведения эксперимента:  $V=13,08\text{м/сек}$  ( $n=1000\text{об/мин}$ ).

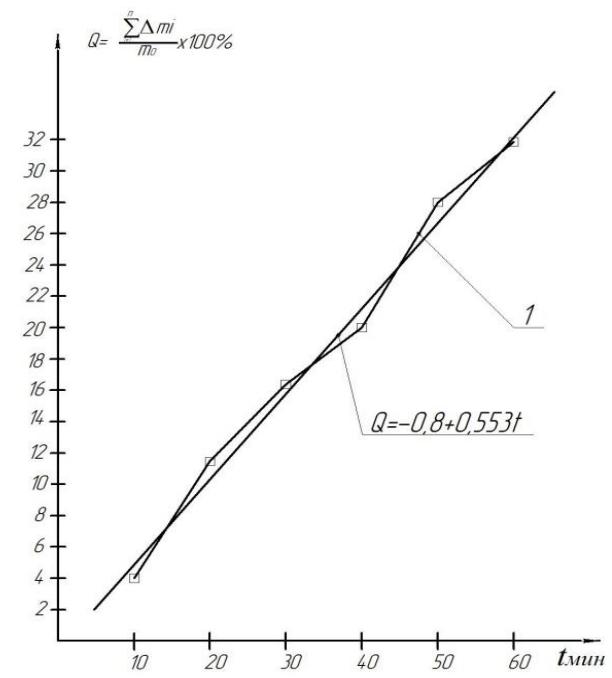


Рис.7. График зависимости производительности от времени при сухой обработке лазурита. Условия проведения эксперимента:  $V=15,7\text{м/сек}$  ( $n=1200\text{об/мин}$ ).

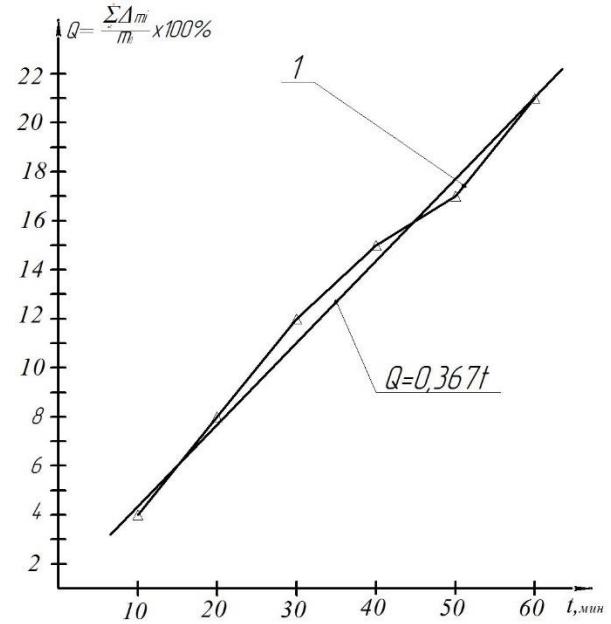


Рис.8. График зависимости производительности от времени при обработке лазурита в жидкой среде. Условия проведения эксперимента:  $V=7,85\text{м/сек}$  ( $n=600\text{об/мин}$ ).

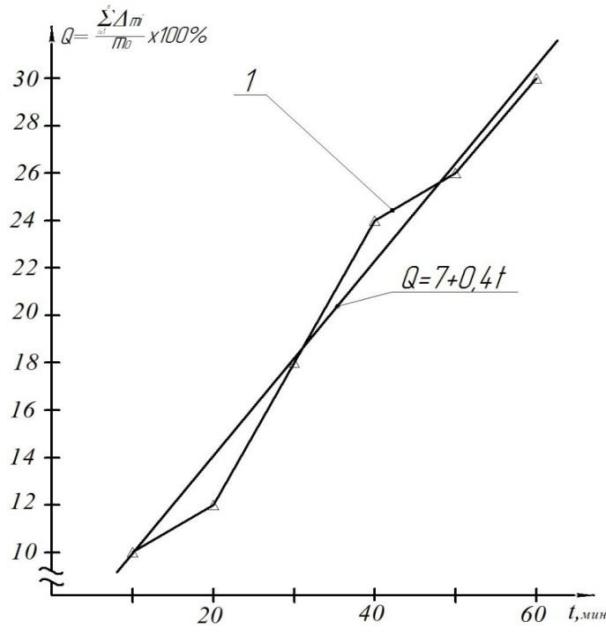


Рис.9. График зависимости производительности от времени при обработке лазурита в жидкой среде. Условия проведения эксперимента:  $V = 13,08\text{м/сек}$  ( $n=1000\text{об/мин}$ )

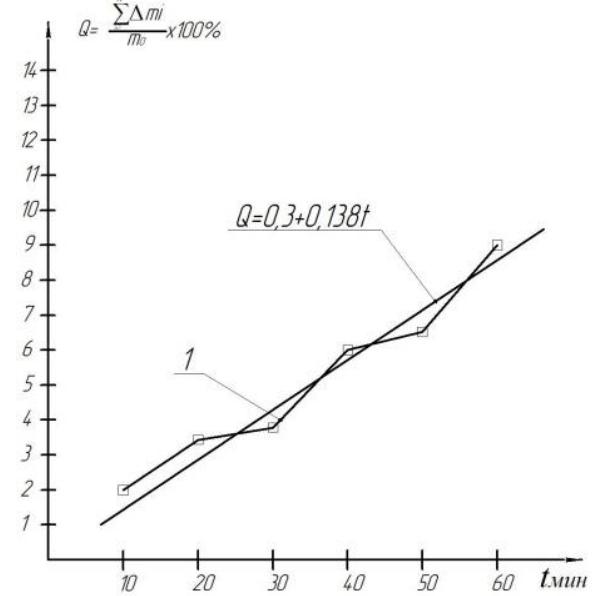


Рис.11. График зависимости производительности от времени при сухой обработке аметиста. Условия проведения эксперимента:  $V = 7,85\text{м/сек}$  ( $n=600\text{об/мин}$ ).

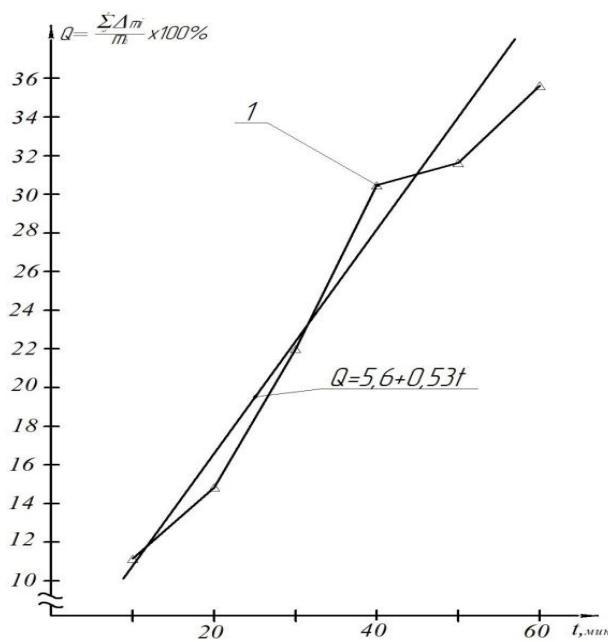


Рис.10. График зависимости производительности от времени при обработке лазурита в жидкой среде. Условия проведения эксперимента:  $V = 15,7\text{м/сек}$  ( $n=1200\text{об/мин}$ ).

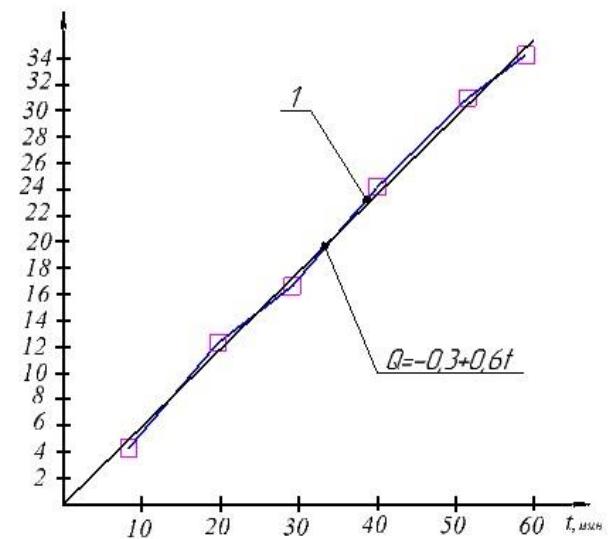


Рис.12. График зависимости производительности от времени при сухой обработке аметиста. Условия проведения эксперимента:  $V = 13,08\text{м/сек}$  ( $n=1000\text{об/мин}$ ).

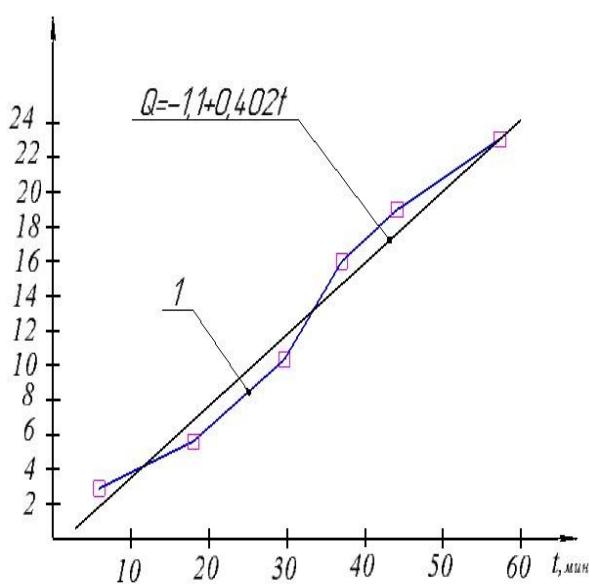


Рис.13. График зависимости производительности от времени при сухой обработке аметиста. Условия проведения эксперимента:  $V=15,7\text{м/сек}$  ( $n=1200\text{об/мин}$ ).

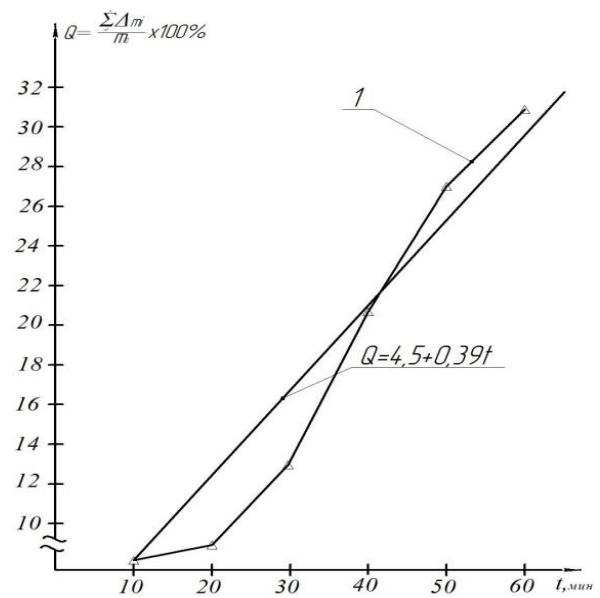


Рис.15. График зависимости производительности от времени при обработке аметиста в жидкой среде. Условия проведения эксперимента:  $V=13,08\text{м/сек}$  ( $n=1000\text{об/мин}$ ).

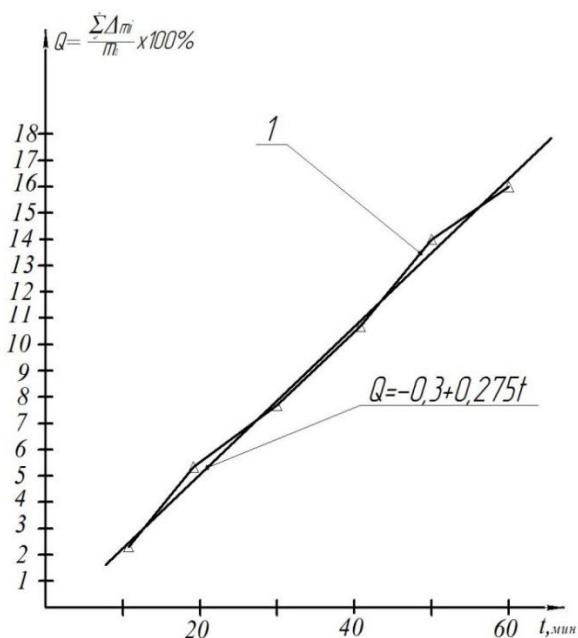


Рис.14. График зависимости производительности от времени при обработке аметиста в жидкой среде. Условия проведения эксперимента:  $V=7,85\text{м/сек}$  ( $n=600\text{об/мин}$ ).

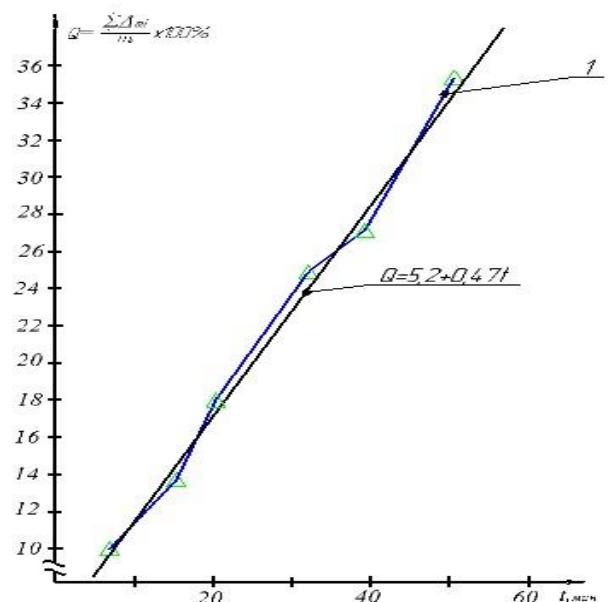


Рис.16. График зависимости производительности от времени при обработке в жидкой среде. Материал змеевик: условия проведения эксперимента:  $V=15,7\text{м/сек}$  ( $n=1200\text{об/мин}$ ).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### **Расчет экономической эффективности разработанной конструкции**

Экономическая эффективность процесса обработки шариков из самоцветных камней при центробежной абразивной галтовке.

Сравнением двух вариантов технологического процесса изготовление шаров диаметрами 6-16мм исходя из эксплуатационных показателей (производственного и проектного) и определяем экономическую эффективность предлагаемого варианта.

#### **Краткая характеристика сравниваемых вариантов**

Производственный вариант	Проектируемый вариант
1	2
<u>Оборудование:</u> 1. Станок галтовочный с горизонтальной осью вращения. 2. Стоимость станка - 4000 сомон 3. Станок для профилирования шара 5500 сомон	<u>Оборудование:</u> 1. Станок для центробежной абразивной галтовке. 2. Стоимость станка -7800сомон
<u>Операции – Барабанная галтовочная</u> 1.1. Инструмент – свободный абразив-электрокорунд зернистость 100мкм, – барабан галтовочный диаметр 0,5м 1.2. Обрабатываемый материал- шаровидная заготовка (куб с отрезанными гранями) из лазурита <u>Операция- профилирование шара</u> 2.1. Станок двухдисковый с вертикальной осью вращения 2.2. Обрабатываемый материал- шаровидная заготовка	<u>Операции – Центробежная галтовка</u> 1. Инструмент –алмазный круг, зернистость 100мкм., 2. Обрабатываемый материал- кубики из лазурита
<u>Тип производства – серийный</u>	<u>Тип производства – серийный</u>

1. Условия труда – нормальные. 2. Форма оплата труда – сдельная 3. Количество оборудования необходимой для выполнения производственной программы: - галтовочный с горизонтальной осью вращения- 1 штук 4. Станок для профилирование шара- 2шт 5. Коэффициент загрузки оборудования: - 0,75.	1. Условия труда – нормальные. 2. Форма оплата труда – сдельная 3. Количество оборудования необходимой для выполнения производственной программы: галтовочный с горизонтальной осью вращения- 1 штук 4. Станок для профилирование шара- 1шт 5. Коэффициент загрузки оборудования: - 0,85
<u>Годовая программа выпуска-200000</u>	<u>Годовая программа выпуска-16000</u>
<u>Штучное время выполнения операции при производственном варианте</u> <u><math>T_{шт.}=1,2</math> мин</u>	<u>Штучное время выполнения операции при проектном варианте</u> <u><math>T_{шт.}=0,6</math> мин</u>

Приведенная годовая экономия определялась по формуле:

$$\mathcal{E}_r = \frac{C_{01} - C_{02}}{100} \times N_r, \quad (1)$$

где:  $C_{01}$  и  $C_{02}$  – технологическая себестоимость сравниваемых операций.

Технологическая себестоимость операции определялась как:

$$C_0 = \frac{C_{п.з.} T_{шт.}}{60 \cdot K_B}, \quad (2)$$

$$\text{где } C_{п.з.} = C_3 + C_{ч.з.} + E_H (K_c + K_3) \quad (3)$$

$C_3$  – основная и дополнительная заработка плата, а также начисления на соцстрах оператору и наладчику за физический час работы обслуживающих машин, определяемые по формуле (5), дирам /час;

$C_{ч.з.}$  – часовые затраты по эксплуатации рабочего места, определяемые по формуле (6), дирам /час;

$E_H$  – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальныхложений: для машиностроения  $E_H=0,15$ ;

$K_c$  – удельные часовые капитальные вложения в станок, определяемые по формуле (3), дирам/час;

$$K_c = \frac{I_B \times 100}{F_d \times n_3} \quad (4)$$

$K_3$  - удельные часовые капитальные вложения в здание, определяемые по формуле (4), дирам /час;

$$K_3 = \frac{F \cdot 78,4 \times 100}{F_d \times n_3} \quad (5)$$

Основную и дополнительную заработную плату, а также начисления на соцстрах оператору и наладчику можно определить по формуле

$$C_3 = C_{т.ф.} \times 1,53 \cdot k, \quad (6)$$

где  $C_{т.ф.}$  – часовая тарифная ставка рабочего соответствующего разряда, дирам /час;

$k=1$ -наладка станка в серийном производстве ведется без участия наладчика самим рабочим.

$$C_{ч.з.} = C_{ч.з.}^{б.у.} \cdot k_m, \quad (7)$$

$k_m$ -машино-коэффициент, показывающий, во сколько раз затраты, связанные с работой данного станка, больше, чем аналогичные расходы у базового станка.

Для шлифовальных станков

$$k_m = \left( \frac{5,07 \bar{I}}{1000} + 1,11R + 0,63M_y \right) \frac{1}{20} \quad (8)$$

$\bar{I}$ - балансовая стоимость станка определяемая как сумма оптовой цены станка и затрат на транспортирование и монтаж, составляющих 10% от оптовой цены станка, сом.;

$I=15000$  сом. – цена станка по базовому варианту

$I_b=15000 \times 1,1=16500$  сом.

$I_{пр}=7800$  сом. – цена станка по проектному варианту

$I_{пр}=7800 \times 1,1= 8580$  сом. (собственного изготовления)

$R$ - суммарная ремонтная сложность механической и электрической частей станка;

$$R = R_M + R_E \quad (9)$$

$R_1=10$  - суммарная ремонтная сложность механической и электрической частей станка по базовому варианту,

$R_1=8$  - суммарная ремонтная сложность механической и электрической частей станка по проектному варианту.

$M_y$  - установленная мощность двигателей станка, квт.

$M_{y1}=3$  квт. установленная мощность двигателя станка в базовом варианте,

$M_{y2}=3$  квт. установленная мощность двигателя станка в проектном варианте.

Необходимо сопоставить два варианта технологического процесса изготовления шаров из лазурита.

Обрабатываемый материал –шаровидная заготовка (куб с отрезанными гранями) из лазурита –200.000 штук/год.

Расчет по базовому технологическому процессу формообразования шаров. Обработка шаров при производственном варианте:

$\Pi_6=15000 \times 1,1=16500$  сомони;

$T_{шт}=1,2$  мин.;

$f=1,505 \times 1,19=1,79 \text{ м}^2$ ;

$P=1$ ;  $E_H=0,15$ .

Основная и дополнительная зарплата с начислениями с учетом многостаночного обслуживания:

$$C_3 = C_{т.ф.} \times 1,53 \times k = 800 \times 1,53 \times 1 = 1224 \text{ дирам/час}$$

Часовые затраты по эксплуатации рабочего места:

$$C_{ч.з.} = C_{ч.з.}^{б.у.} \cdot k_M = 500 \cdot 2,88 = 1440 \text{ дирам/час}$$

где  $C_{ч.з.}^{б.у.} = 500$  дирам/час часовая тарифная ставка для рабочего 3-го разряда

$$k_M = \left( \frac{5,07\Pi}{1000} + 1,11R + 0,63M_y \right) \frac{1}{20} = 2,88$$

Капитальное вложение в станок (дирам/час) определяем по формуле:

$$K_C = \frac{I_B * 100}{F_D * n_3} = \frac{16500 * 100}{2030 * 0,75} = 1084 \text{ дирам/час},$$

Капитальное вложение в здание (дирам/час)

$$K_3 = \frac{F * 78,4 * 100}{F_D * n_3} = \frac{7,16 * 78,4 * 100}{2030 * 0,8} = 34,56 \text{ дирам/час}$$

где:  $F=4 \times 1,79 = 7,16 \text{ м}^2$

Часовые приведенные затраты можно определить по формуле (3):

$$C_{\text{п.з.}} = C_3 + C_{\text{ч.з.}} + E_H (K_C + K_3)$$

Подставив значения получаем.

$$C_{\text{п.з.}} = 1224 + 1440 + 0,15 \times (1084 + 34,56) = 2831,8 \text{ дирам/час.}$$

Тогда, технологическая себестоимость составит:

$$C_{\text{с.з.}} = \frac{C_{\text{п.з.}} \times T_{\text{шт}}(\text{шт-к})}{60 \times R_B} = \frac{2831,8 \times 1,2}{60 \times 1,3} = 43,57 \text{ дирам}$$

**Проектный вариант** изготовление шаров способом центробежной обработки.

$I_B = 7800 \times 1,1 = 8580 \text{ сомони};$

$T_{\text{шт2}} = 0,6 \text{ мин.};$

$f = 1,25 \times 1,1 = 1,375 \text{ м}^2;$

$E_H = 0,15.$

Часовые приведенные затраты можно определить по формуле:

$$C_{\text{п.з.}} = C_3 + C_{\text{ч.з.}} + E_H \times (K_C + K_3),$$

Основная и дополнительная зарплата с начислениями с учетом многостаночного обслуживания:

$$C_3 = 1,53 \times C_{\text{TФ}} \times k_M = 1,53 \times 610 \times 1 = 933,3 \text{ дирам/час},$$

Часовые затраты по эксплуатации рабочего места:

$$C_{\text{ч.з.}} = C_{\text{ч.з.}}^{б.у.} \times k_M = 500 \times 1,06 = 530 \text{ дирам/час}$$

где  $C_{\text{ч.з.}}^{б.у.} = 530 \text{ дирам/час}$  часовая тарифная ставка для рабочего 3-го разряда

$$k_M = \left( \frac{5,07 \Pi}{1000} + 1,11R + 0,63M_y \right) \frac{1}{20} = 1,09$$

Капитальное вложение в станок (дирам/час) определяем по формуле:

$$K_C = \frac{I_B \times 100}{F_d \times n_3} = \frac{8580 \times 100}{2030 \times 0,75} = 563,5 \text{ дирам/час},$$

Капитальное вложение в здание (дирам/час)

$$K_3 = \frac{F \times 78,4 \times 100}{F_d \times n_3} = \frac{5,5 \times 78,4 \times 100}{2030 \times 0,8} = 26,55 \text{ дирам/час}$$

$$F = 4 \times 1,375 = 5,5 \text{ м}^2.$$

Подставив значения получаем:

$$C_{п.з} = 933,3 + 530 + 0,15 \times (563,5 + 26,55) = 1551,8 \text{ дирам/час}$$

Тогда, технологическая себестоимость по проектному варианту составит:

$$C_{O2} = \frac{C_{п.з} \times T_{шт}(шт-к)}{60 \times R_B} = \frac{1551,8 \times 0,6}{60 \times 1,3} = 11,9 \text{ дирам}$$

Полученные данные занесем в сводную таблицу 1 и рассчитаем годовой экономический эффект от внедрения наилучшего варианта.

Сравниваемые варианты обработки шариков из лазурита.

Таблица 1

Наименование позиций	Варианты	
	Базовый	проектный
Отличающиеся операции абразивной обработки		
Операция	Обработка по производственной технологии	Обработка по проектной технологии
Технологическая себестоимость, дирам	43,57 дирам	11,9 дирам

Годовой экономический эффект:

$$\vartheta_g = \frac{C_{01} - C_{02}}{100} \times N_g = \frac{(43,57 - 11,9)}{100} \times 200000 = 63340 \text{ сомони.}$$

Замена операций позволяет сократить технологический цикл изготовления изделия и снизить себестоимость его изготовления, что позволит получить дополнительную прибыль в размере 63340 сом.

### **ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

**Оборудование и заготовки, используемые при работе.**



**Рис.П1. Галтовочный барабан с горизонтальной осью вращения**



**Рис.П2. Станок для планетарно-центробежной обработки**



**Рис.П3. Станок для центробежной абразивной галтовки**



**Рис.П4. Станок для центробежной  
абразивной обработки**



**Рис.П5. Проектор оптического  
профиля 400Н**



**Рис.П6. Образец камня до обработки**



**Рис.П7. Образец камня после резки (заготовки для получения шариков)**



**Рис.П8. Исходное сырье и его формообразование в виде шариков**



**Рис.П9. Образцы изделий из обработанных камней**

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Малый патент, акт внедрения и сертификаты



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Мы нижеподписавшиеся, докторант PhD кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Таджикского технического университета (ТТУ) имени академика М.С.Осими, Холов Ф.Б., с одной стороны, и главный технолог ООО «РУХОМ» Ахмедов А., начальник производственного участка Вохидов М., с другой стороны, заключили настоящий акт о том, что в ООО «РУХОМ» проведены опытно-промышленные испытания и приняты к внедрению **запатентованные под № TJ1361 –**

«Устройство для многодисковой центробежной абразивной обработки шариков». Были проведены испытания опытной установки с образцами таких камней как; офиокальцит, оникс, лазурит, аметист. Испытания показали, что производительность обработки при использовании данной установки в среднем в 4 раза выше, чем при традиционном способом изготовления шариков из самоцветных камней, а доля ручного труда при этом снижается на 80%. На этой установке можно обработать шарики из различных материалов в диапазоне размеров 6 - 16 мм. Это позволяет обеспечить высокую эффективность и гибкость многономенклатурного производства, каким является производство изделий из самоцветных камней.

При расчете технико-экономических показателей выявлено, что экономический эффект от использования данной изобретении составляет 63340 сомон в год.

От ТТУ им.ак.Осими  
Докторант PhD кафедры  
«Технология машиностроения  
металлорежущие станки  
и инструменты»  
Холов Ф.Б.

От ООО «РУХОМ»  
Главный технолог  
Ахмедов А.

Нач.производственного участка  
Вохидов М.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «НАУЧНЫЕ ГОРИЗОНТЫ»

**СЕРТИФИКАТ  
О ПУБЛИКАЦИИ**



подтверждает, что

**Холов Фаридун Буриевич**

*опубликовал статью*

**БАРАБАННАЯ ГАЛТОВКА ЗАГОТОВОК ИЗ САМОЦВЕТНЫХ  
КАМНЕЙ**



в Международном научном журнале «Научные горизонты» №8(60)/2022 от 31.08.2022г.  
Номер сертификата №5-8(60),2022

Проверка по ссылке <https://www.scientific-horizon.ru/reestr-sertifikatov>

Главный редактор



М.В. Всяких

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ ФС77-69499 от 25 апреля 2017 г.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «НАУЧНЫЕ ГОРИЗОНТЫ»

**СЕРТИФИКАТ  
О ПУБЛИКАЦИИ**



подтверждает, что

**Холов Фаридун Буриевич**

*опубликовал статью*

**ПЛАНЕТАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ИЗ  
САМОЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ**



в Международном научном журнале «Научные горизонты» №8(60)/2022 от 31.08.2022г.  
Номер сертификата №11-8(60),2022

Проверка по ссылке <https://www.scientific-horizon.ru/reestr-sertifikatov>

Главный редактор



М.В. Всяких

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ ФС77-69499 от 25 апреля 2017 г.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 5**

## Технологический процесс изготовления шариков из лазурита

Инв.№ подп.	Взаммн.№	Припись и дата			ТТУ, каф. ТММСиИ	Карта технологического процесса абразивной обработки-галтовки	Центробежно-абразивная обработка				
							Операция	Шифр группы деталей	Шифр технологического процесса		
							Галтовка				
							<b>Номер операции 005</b>				
							Содержание операции				
							ЗАГОТОВИТЕЛЬНАЯ				
							Оборудование (наименование, модель)				
							Приспособления, приборы и инструменты				
								Число оборотов			
								Обороты инструмента, бланши			
								Подача заготовок мм/мин			
								Соотношение деталей, наполните- ли и пустоты			
								Температура			
									Время обработки на партию мин.		
										Вид	
										Марка	
										ГОСТ, ТУ	
										Грануляция	
										Наименование компонентов	
										ГОСТ, ТУ	
										Содержание, в г/л	

	Операция	Шифр группы деталей	Шифр технологического процесса		ТТУ, каф. ТММСиИ	Карта технологического процесса абразивной обработки-галтовки					Центробежно-абразивная обработка																	
						Режимы обработки					Наполнитель			Жидкостная среда														
Номер операции 010	Содержание операции ЦЕНТРОБЕЖНО-АБРАЗИВНЫЙ МНОГОИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ			Оборудование (наименование, модель)	Приспособления, приборы и инструменты	Число оборотов гаговочного барабана в минуту	Соотношение деталей, наполнители и пустоты	Температура	Вид	Марка	ГОСТ, ТУ	Грануляция	Наименование компонентов	ГОСТ, ТУ	Содержание, в Г/л													
	№		—																									
	№		—																									
	Материал: кубики из Лазурита: 16x16x16 мм с отрезанными на одинаковый размер вершинами		—																									
	1		Проверить качество заготовок визуально																									
	2		Загрузить заготовок, наполнитель и залить жидкостную среду		Центробежно-абразивный многонструм. станок	Алмазный отрезной диск	—								№100													
	3		Провести обработку				500								Вода													
	4		Выгрузить и отделить детали от наполнителя				—								Сода кальц.													
	5		Отбраковать поломанные заготовки				—								5													
	6		Промыть детали				—																					
	7		Просушить детали				—																					
	8		Проверить качество деталей визуально				—																					
	9		Промыть контейнера от абразива и шлаков				—																					
Изв № подп.	Подпись	Взам инв №	Взам инв №	Изм. №	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	изм. №	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Н.контр.	Разраб. Холов Ф. Б.		Лист											
															Провер. Мирзоалиев И													
															Номир.		Листов											
															Утврд.													

