

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

УДК 621.923

На правах рукописи

**ИМОМЗОДА НАЗАРАЛИ БАРОТАЛИ  
ПРОЦЕСС ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ШАРИКОВ  
ИЗ ПОДЕЛОЧНЫХ КАМНЕЙ НА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СТАНКАХ  
С ВРАЩАЮЩИМСЯ ДНОМ**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.02.07 – Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Научный руководитель:  
Мирзоалиев Исроил  
кандидат технических наук, доцент

Душанбе – 2025

# ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	7
ГЛАВА I. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1. Сведения об обрабатываемых материалах. Абразивы и абразивные инструменты.....	11
1.1.1. Свойства камней, используемых в ювелирной промышленности...	11
1.1.2. Виды абразивной обработки .....	14
1.1.3. Зернистость абразива .....	15
1.1.4. Абразивные материалы .....	16
1.2. Способы галтовки. Оборудования, применяемые при галтовке.....	18
1.2.1. Галтовка в барабанах с горизонтальной или наклонной осью вращения .....	19
1.2.2. Метод вибрационной обработки заготовок.....	20
1.2.3. Центробежно-ротационная обработка заготовок .....	21
1.2.4. Турбоабразивная обработка поверхностей деталей.....	23
1.2.5. Магнитно-абразивная обработка поверхностей деталей.....	25
1.2.6. Финишная обработка деталей уплотненным потоком абразивных частиц.....	28
1.2.7. Планетарно-центробежная обработка.....	29
Применение способов центробежной абразивной обработки при изготовлении шариков из самоцветных камней.....	35
1.3.1. Предложенная конструкция устройства для обработки шариков из самоцветных камней.....	43
1.4. Цель и основные задачи исследования.....	45
1.5. Заключение к главе 1.....	47
ГЛАВА2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ШАРИКОВ ИЗ САМОЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ.....	48
2.1. Исследование процесса галтовки кубиков из самоцветных камней.....	48
2.1.1. Галтовка в барабанах с горизонтальной или наклонной осью вращения.....	48
2.1.2. Планетарно-центробежная галтовка кубков из самоцветных камней.....	52

2.1.3. Исследование формообразования шариков при обработке на двухдисковом станке.....	56
2.1.4. Профилирование шара между отрезками труб .....	58
2.1.5. Формирование шаров на центробежных станках .....	60
2.2. Предлагаемый способ центробежно-абразивной обработки самоцветных камней на станке с направляющими пластинами.....	66
2.2.1. Устройство новой конструкции для обработки шариков из самоцветных камней.....	66
2.3. Заключение к главе II.....	77
<b>ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ, ПРОВЕДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....</b>	<b>79</b>
3.1. Оборудования, применяемые при экспериментальных исследованиях.....	79
3.2. Материалы и образцы, используемые при проведении экспериментов.....	85
3.3. Методика проведения эксперимента на станках для центробежной абразивной обработки.....	87
3.3.1. Методика метрологических исследований.....	88
3.3.2. Измерение формы деталей.....	88
3.3.3. Измерение шероховатости поверхности.....	91
3.4. Методика проведения экспериментов и обработка экспериментальных данных.....	95
3.4.1. Методика обработки экспериментальных данных.....	97
3.4.2. Статистическая обработка экспериментальных данных.....	98
3.4.3. Заключение к главе III .....	100
<b>ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ НА СТАНКЕ С НАПРАВЛЯЮЩИМИ ПЛАСТИНАМИ.....</b>	<b>101</b>
4.1.Проведение экспериментов и анализ результатов обработки.....	101
4.1.1. Влияние продолжительности обработки на величину съема.....	101
4.1.2. Влияние линейной скорости инструмента на производительность обработки.....	108
4.1.3. Влияние зернистости абразива на производительность обработки...	109
4.1.4. Влияние угла наклона направляющей пластины на производительность обработки .....	111
4.1.5. Влияние угла наклона направляющей пластины на равномерность изнашивания инструмента при обработке.....	113
4.2.Исследование точности формы от факторов режима обработки.....	116

4.2.1. Исследование зависимости исправления формы от угла наклона направляющей пластины.....	116	
4.2.2. Влияние продолжительности обработки на точность размеров шаровидных изделий.....	117	
4.2.3. Влияние линейной скорости инструмента на исправление формы шаровидных заготовок из ониксита и лазурита.....	118	
4.2.4. Исследование зависимости шероховатости поверхности от режимов обработки.....	119	
4.3. Проведение многофакторного эксперимента и обработка полученных результатов.....	121	
4.3.1. Многофакторное исследование процесса центробежной абразивной обработки на станке с направляющими пластинами.....	122	
4.5. Заключение к главе IV.....	127	
<b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И РЕ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>, [АЦИИ .....</b>	<b>128</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>	<b>130</b>	
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>141</b>	
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>	<b>148</b>	
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>	<b>149</b>	
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....</b>	<b>150</b>	
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....</b>	<b>153</b>	
		<b>154</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Таджикистан богат уникальными месторождениями драгоценных, полудрагоценных и поделочных камней. Однако эти богатейшие ресурсы используются недостаточно. Производство ювелирных изделий из самоцветных камней связано с большими трудозатратами и малой производительностью. В ювелирном производстве большинство операций, связанных с обработкой самоцветных камней, выполняется вручную и имеет малую производительность. Поэтому совершенствование техники и технологии производства в этом направлении может существенно повысить эффективность операций, связанных с обработкой самоцветных камней.

Шаровидные изделия составляют основу большинства ювелирных изделий из самоцветных камней. Традиционно используемые при формообразовании кубических заготовок методы галтовки в барабанах с горизонтальной осью вращения недостаточно производительны, также не обеспечивают стабильность получения требуемых форм и качества поверхности. Методы центробежной обработки по производительности превосходят методы барабанной галтовки.

Силы, действующие при центробежной абразивной обработке, в разы больше, чем при галтовке в барабанах. Поэтому в зависимости от характера действия этих сил возможны появление дефектов и поломка камней. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования по разработке новых способов центробежной абразивной обработки, обеспечивающие наиболее высокую производительность и качественную обработку изделий из самоцветных камней.

**Степень разработанности работы.** Существенный вклад в разработку изучаемой проблемы внесли Мартынов А.Н. [18], Скворчевский Н.Я. [21], Мирзоалиев А.И., Убайдуллоев А.Н., Ходжаев Т.А. [29], Панасов П.П. [62] ва Бабичев А.П. [9] и др. Исследование и разработка методов изучения этих задач, несомненно, являются актуальными и представляют научный интерес. Данная работа завершена и в том числе выполнены теоретические и экспериментальные

исследования процесса обработки самоцветных камней с использованием центробежных методах обработки. В диссертационной работе учтены и использованы исследования ученых в данной области.

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами.**

Исследование и научные работы 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** данного исследования является повышение производительности и геометрической точности процесса изготовления шариков из самоцветных камней путём совершенствования оборудования и технологии производства.

### **Задачами диссертационной работы являются:**

-исследование возможности повышения производительности и точности геометрической формы шариков из самоцветных камней за счет усовершенствования конструкции станков;

-установление технологических факторов, связанных с режимами обработки на производительность и точность обработки;

-исследование условия обеспечения равномерного изнашивания инструмента;

-исследование влияния основных факторов на точность формы сферических поверхностей;

-многофакторное исследование процесса обработки и установление зависимости параметров процесса обработки от действующих факторов;

-разработка оборудования для осуществления предлагаемого способа обработки;

-определение экономической целесообразности использования данного способа обработки в промышленности.

**Предмет исследования:** Таковым является доказательство утверждения о разрешимости и производство ювелирных изделий из полудрагоценных камней и украшений с чрезмерным использованием металла, а также возникновение износа и поломки камней.

**Методы исследования:**

1. Метод анализа, классификации и упорядочения исходной информации

2. Методы экспериментального исследования процессов

формообразования шариков.

3. Статистические методы планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных.

4. Сравнительно-сопоставительный метод оценки результатов.

**Объектом исследования** является процессы изготовления шариков из самоцветных камней путём совершенствования оборудования и технологии производства.

**Научная новизна полученных результатов:**

-разработана конструкция станка с направляющими пластинами, защищенная патентом на изобретение (патент № ТJ 1199);

-исследованы взаимосвязи движения шариков от линейной скорости инструмента и угла наклона направляющих пластин;

-исследованы условия обеспечения равномерного изнашивания инструмента при обработке;

-получены аналитические зависимости для расчета производительности, точности формы шариков из самоцветных камней от режимов обработки;

-исследованы зависимости шероховатости обрабатываемых поверхностей изделий от технологических факторов процесса и получены математические модели процесса обработки.

**Теоретическая и научно-практическая значимость работы  
заключается в:**

-разработке новой конструкции станка, обеспечивающей более высокую производительность и точность обработки;

-разработке технологического процесса осуществления обработки с использованием разработанного оборудования;

-определении области эффективного применения разработанного станка;

-проектировании, изготовлении и испытании станка новой конструкции, обеспечивающей более высокую производительность и точность обработки.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

-конструкция устройства для центробежной абразивной обработки шариков, новизна которой защищена патентом № TJ 1199 Республики Таджикистан;

-зависимость производительности и точности обработки от основных факторов на центробежном станке с направляющими пластинами;

-результаты исследования исправления формы шаров от режимов обработки;

-результаты исследования возможности обеспечения равномерного изнашивания инструмента в процессе работы;

-математическая модель процесса обработки исправления формы изделий;

-исследование зависимости процесса формообразования шаров от отдельных факторов процесса обработки.

**Степень достоверности результатов.** Традиционно используемые при формообразовании кубических заготовок методы галтовки в барабанах с горизонтальной осью, а также обеспечивают стабильность получения требуемых форм и качества поверхности. Методы центробежной обработки по производительности превосходят методы барабанной галтовки. Они согласуются с результатами других авторов, полученных в частных случаях.

**Соответствие диссертации сертификату по научной специальности.**

Научная диссертация соответствует паспорту специальности 05.02.07 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки:

пункты 1. Процессы физико-химической обработки материалов, включая комбинированную и высокоэнергетическую обработку материалов с наложением различных энергетических воздействий; 3. Механизмы взаимодействия инструмента, технологической среды с материалом заготовки, формирования напряженного состояния, структурно-фазовых превращений в изделии и инструменте, как при механической обработке, так и при воздействии направленных потоков энергии различной природы; 5. Математическое и физическое моделирование, оптимизация и диагностика процессов, оборудования и инструментов для физико-химической обработки в целях повышения технико-экономических показателей средств.

**Личный вклад соискателя** заключается в:

-разработке станка новой конструкции и его проектировании, изготовлении и испытании;

-подготовке и проведении экспериментов, и анализе полученных результатов;

-проведении теоретических и экспериментальных исследований процесса обработки и установлении взаимосвязи параметров производительности и точности с режимами обработки;

-разработке технологического процесса обработки и рекомендации по использованию результатов исследования процесса в промышленности.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации обсуждались на международных: Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», Таджикский технический университет им. ак. М.С. Осими (Душанбе, 2019); республиканской научно-практической конференции «проблемы металлургии таджикистана и пути их решения». (Душанбе 2019); материалы международной научно-технической конференции.13-15 ноября 2019 года.Минск. Республика Беларусь; материалы 14-й международной научно-технической конференции.17-19 ноября 2021 года. Минск. Республика Беларусь; международной научно-практической конференции студентов,магистрантов,аспирантов и учёных «Мухандис 2019 »,

(Душанбе, 2019); материалы Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», Таджикский технический университет им. ак. М.С. Осими (Душанбе, 2019).

**республиканских:** Республиканская научно-практическая конференция «Основные проблемы полной переработки хлопка в Республике Таджикистан» 15-16 апреля 2021 г. Таджикский технический университете им.ак. М.С. Осими. -Душанбе, 2021. -С 171-17. Республиканская научно-практическая конференция «Повышение осведомленности об использовании водоёмные ресурсы» 13-14 мая 2021. – Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими, 2021. - С 338-341, ISBN 978-99975. - 900-8-4;Наука и инновация. Таджикский национальный Университет. Серия геологических и технических наук 2024. №1. 19.03.2024. С-66-74. SSN2664-1534; /Наука и инновация. Таджикский национальный Университет. Серия геологических и технических наук 2023. №3. 20.09.2023. С-54-63 Пайеми Донишгохи Технологии Тоҷикистон. №41(55). Душнбē 2023 С.17-24. ISSN2707-8000; Пайеми Политехники. №1. 1. 2023.С 4-11; Пайеми Политехники. №2. 25.10. 2023.С 4-9.

**Публикации.** Основные положения и выводы, сформулированные в диссертации, опубликованы в 24 научных работах, и 2-го патента на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, заключения, списка использованных источников и приложения. Содержание диссертации изложено на 164 страницах компьютерного набора, включая 4 таблиц, 60 рисунков, 6 приложений, библиографический список из 122 наименований.

# **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1. Сведения об обрабатываемых материалах. Абразивы и абразивные инструменты**

### **1.1.1. Свойства камней, используемых в ювелирной промышленности**

При изготовлении ювелирных изделий широко применяют различные самоцветные камни.

Камни, используемые в ювелирной промышленности, характеризуются такими свойствами, как:

**Красотою, определяющейся показателями:** окраской, цветом, блеском и другими оптическими свойствами.

**Стойкостью** - устойчивостью против внешних факторов (воздействием химических реагентов, перепадом температуры), твердостью.

**-Обрабатываемостью** - способностью к механической обработке.

**-Редкостью** – данный показатель в основном относится к драгоценным камням.

**Химические свойства.** По химическому составу большинство самоцветных камней относится к силикатам и окислам. Несмотря на распространенность веществ, из которых состоят драгоценные камни, они различаются по красоте, обрабатываемости, а также устойчивости против химических реагентов.

Рассмотрим более подробно механические и физико-химические характеристики самоцветных камней.

**-Плотность.** Это показатель - один из важнейших при определении качества самоцветных камней, а также для выявления подделок. Плотность определяется как отношение массы камня к его объему. Значение плотности для камней находится в пределах от 1 до 5. Самым легким камнем считается янтарь - его плотность 1,0—1,1, а наиболее тяжелым является гематит с плотностью 4,9—5,3.

**Твердость.** От твердости камня зависит стойкость и долговечность изделий, сохранность и четкость его геометрической формы, а также нестираемость.

Для определения твердости камня используют шкалу Мооса.

Твердость по шкале Мооса для некоторых камней следующая:

янтарь-2,5; малахит- 3,5; лазурит- 5,5; халцедон- 6; гранат-6,5; кварц-7; аметист-7; циркон- 7,5; рубин-9; алмаз-10

Более точную оценку твердости камня производят применением метода Бринелли, основанном на вдавливании в исследуемый минерал алмазной призмы.

**Цвет (окраска камня).** Это свойство ювелирных камней является наиболее важным. По окраске камни делятся на идиохроматические и аллохроматические.  
- Идиохроматическая, означает постоянную окраску камня (от греческого «идиос» — собственный и «хромое» — цвет).

Например, малахиту свойственна зеленая окраска. Это окраска характерна для группы поделочных или цветных камней.

Аллохроматическая (от греческого «аллос» — иной, чужой), имеется в виду изменчивая окраска камня. Цвет камня в этом случае меняется в зависимости от наличия в нем примесей другого элемента. Эти примеси обычно присутствуют в малых количествах. Например, чистый корунд, состоящий из окиси алюминия и не имеющий примесей, бесцветен и прозрачен. При наличии примеси в виде окиси хрома корунд приобретает красную окраску и его называют рубином. При наличии в корунде в небольшом количестве железа и титана он приобретает синий цвет. Такой камень называют сапфиром. Цвет камня является одним из главных его показателей. Камни имеют множество разнообразных цветовых оттенков. Есть и такие, которые меняют цвет в зависимости от вида освещения. Например, александрит при дневном свете имеет темно-зеленую окраску, а при искусственном освещении становится малиново-красным.

Турмалин при дневном свете становится розовым, а при искусственном освещении - тусклым и темным. Цвет уральского фиолетового аметиста при электрическом освещении из розового превращается в кроваво-красный.

**Оптические свойства.** В зависимости от степени прозрачности камни делятся на: прозрачные, непрозрачные и просвечивающие. Оптические свойства

камней определяются следующими показателями: прозрачностью, показателем преломления, критическим углом, коэффициентом дисперсии. От совокупности этих свойств зависит блеск камня. Блеск камня зависит от коэффициента преломления. Под преломлением понимается отклонение светового луча от первоначального его направления при переходе его из воздушной среды в камень. Блеск камня тем сильнее, чем больше коэффициент преломления.

Коэффициенты преломления для некоторых камней следующие: алмаз-2,46; обсидиан-1,5; гранат-1,9; рубин-1,77; шпинель-1,72; аметист-1,55.

Угол, при котором происходит переход от преломления к полному внутреннему отражению, называют критическим углом. Данный угол образуется между направлением луча света и нормалью. Значение критического угла также зависит от показателя преломления. Чем больше значение показателя преломления, тем меньше критический угол, при котором происходит полное внутреннее отражение, и тем сильнее блеск камня. Сверкание бриллианта обусловлено тем, что при правильной огранке и высоком показателе преломления (2,46) критический угол равен всего  $24^\circ$ . При этом весь свет, падающий на бриллиант, благодаря полному внутреннему отражению направляется через верхнюю грань, что и обуславливает блеск камня.

При экспериментах использовали самоцветные камни: офит и лазурит.

### **1.1.2. Виды абразивной обработки**

Наиболее широко применяемые виды абразивной обработки следующие: круглое шлифование, плоское шлифование, бесцентровое шлифование, ленточное шлифование, отрезание и разрезание отрезным кругом, притирка поверхностей, хонингование, магнитно-абразивная обработка, пескоструйная обработка, суперфиниширование, полирование, барабанная галтовка, центробежная абразивная обработка и т.д.

Процесс шлифования осуществляется специальным абразивным или алмазным инструментом. Шлифовальный круг вращается с линейной скоростью 30-40м/сек. Абразивные зерна, соприкасаясь с обрабатываемой поверхностью, срезают тончайшие стружки. При шлифовании обеспечивается высокая точность

размера и качество поверхности. В зависимости от формы и размера детали, требования к точности формы и качества поверхности применяются различные методы шлифования. Например, круглое шлифование применяется при обработке наружных диаметров и отверстия. Плоское шлифование при обработке плоскостей также сопряжено с плоскими поверхностями.

**Притирка** применяется для абразивной обработки высокоточных поверхностей, получение размеров с точностью в долях мкм и шероховатостью  $R_a=0,02 - 0,04\text{мкм}$ .

В технологическом процессе изготовления из самоцветных камней широко применяются методы абразивной галтовки, наиболее распространённым из которых является абразивная галтовка в барабанах с горизонтальной осью вращения. Этот метод имеет существенные недостатки: малую производительность, невозможность управления формы деталей, нестабильность параметров качества поверхности. Существуют другие более производительные методы центробежной абразивной обработки. Однако эти методы в настоящее время практически не используются при изготовлении изделий из самоцветных камней по той причине, что могут привести к поломкам и появлению трещин. Исследования показали возможности создания особых методов центробежной абразивной обработки, обеспечивающих качественную производительную обработку самоцветных камней.

Инструменты, наиболее широко используемые в технологическом процессе обработки самоцветных камней в ювелирном производстве, следующие: алмазные отрезные круги, алмазные планшайбы, наждачные бумаги, шлифовальные круги, свободные абразивные зерна, абразивные пасты, галтовочные тела и др. Особенностью этих инструментов является то, что они содержат алмазные или абразивные зерна из твердых материалов, таких как: оксид алюминия, карбид кремния, карбид титана, окись хрома и др.

Одной из основных характеристик абразивных материалов является зернистость абразива.

### **1.1.3. Зернистость абразива**

Абразивные материалы различного назначения отличаются размерами зерен. При черновом шлифовании снимаются большие припуски, а при чистовом шлифовании снимаемый припуск на порядок меньше. Поэтому при черновом шлифовании применяются абразивы, имеющие зерна больших размеров. Абразивные зерна по размеру делятся на: шлифзерна (от № 200 до 15), шлифпорошки (от № 12 до 3), микропорошки (от M63 до M14) и тонкие микропорошки (от M10 до M5). Номер зернистости определяется путем рассеивания на специальных ситах с соответствующими размерами ячеек. В каждый номер зернистости входят зерна, размеры которых расположены в определенном интервале: от минимального до максимального. В пределах одной зернистости следующие фракции: мелкая, основная, крупная и предельная. Процентное содержание основной фракции обозначают индексами В, П, Н и Д.

Абразивные материалы с крупным зерном 43 используются для черновых и обдирочных операций (шлифзерна №200 до 15), шлифпорошки для чистового точения, а микропорошки и тонкие порошки для отделочных работ и полирования.

Существуют различные абразивные материалы, отличающиеся твердостью, хрупкостью, жаростойкостью и т.д.

### **1.1.4. Абразивные материалы**

Основным свойством абразивных материалов является их высокая твердость. Абразивные материалы применяются при обработке труднообрабатываемых материалов, в том числе закаленных сталей, самоцветных камней, керамических изделий, твердых сплавов и т.д.

Такие операции, как шлифование, хонингование, суперфиниширование, полирование, выполняются использованием абразивных инструментов, основу которых составляют абразивные материалы. Слово абразив появилось от французского *abrasif*, что означает соскабливать или царапать. Существуют естественные и искусственные абразивные материалы. К естественным

абразивным материалам можно отнести наждак, пемзу, кварц, корунд, алмаз и др. Производство и применение искусственных абразивных материалов начали с конца XIX века. К искусственным абразивным материалам можно отнести синтетический алмаз, карбид бора, электрокорунд, карбид кремния, кубический нитрит бора и другие. Основная характеристика этих материалов является их высокая твердость. Твёрдость абразивных материалов определяется путем вдавливания алмазной пирамиды в их поверхность. Единица измерения твердости  $\text{Мн}/\text{м}^2$ . Величина твердости для некоторых абразивных материалов следующая: алмаз 84250-100000, электрокорунд 18000—24000, кварц 11000—11300. Другой важной характеристикой абразивных материалов является их абразивная способность. Абразивная способность оценивается массой материала, снимаемого данным абразивом при шлифовании. По абразивной способности абразивные материалы располагаются следующим образом: алмаз, кубический нитрид бора, карбид кремния, монокорунд, электрокорунд, наждак, кремень. На основе этих материалов изготавляются абразивные инструменты, используемые во всех отраслях машиностроения и ювелирной промышленности [1,2,3,4].

Рассмотрим основные абразивные материалы, используемые при изготовлении изделий из камня. Эти материалы можно разделить на естественное и искусственное происхождение.

Абразивные материалы естественного происхождения следующие: алмаз, кварц, корунд, наждак.

Алмаз - наиболее ценный по своим абразивным свойствам материал. Его добывают карьерным способом в коренных кимберлитовых трубках и из россыпных месторождений. Граненные алмазы называют бриллиантом, которые применяют при изготовлении дорогих ювелирных украшений. Из мелких природных алмазов изготавливают алмазные порошки, широко применяемые в алмазных инструментах.

Кварц является одним из наиболее распространенных и дешёвых абразивных материалов. По химическому составу он состоит из

кристаллической двуокиси кремния. При обработке самоцветных камней широко применяется в галтовочных операциях.

Корунд встречается в виде кристаллической оксида алюминия. Его добывают в россыпях и рудах. После добычи корундовая руда измельчается, обогащается и сортируется по величине зерна. Абразивные порошки различной зернистости из корунда широко применяются при обработке самоцветных камней твёрдостью от 3 до 6 по шкале Мооса.

Наждак состоит из корунда и чёрного магнитного оксида железа  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Данний природный минерал применяется в абразивных инструментах различного назначения.

### **К синтетическим абразивным материалам относятся:**

Искусственный алмаз - по химическому составу и твердости аналогичен природному. Широко применяется при обработке труднообрабатываемых материалов.

Кубический нитрид бора или боразон (в постсоветском пространстве кубический нитрид бора известен как эльбор) - сплав бор-углерод-кремний, карбид бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ).

Карбид кремния ( $\text{SiC}$ ) или карборунд - химическое соединение кремния с углеродом применяется при изготовлении абразивных инструментов различного назначения.

Электрокорунд ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) или окись алюминия применяется в составе различных инструментов при обработке чёрных металлов, самоцветных камней и стекла.

Двуокись церия применяется при полировке твёрдых камней типа кварц, агат, нефрит.

Крокус зелёный (окись хрома) применяется для полировки различных материалов, в том числе чёрных и цветных металлов, самоцветных камней.

## **1.2. Способы галтовки. Оборудования, применяемые при галтовке**

При изготовлении изделий из самоцветных камней абразивная галтовка является основной операцией по формообразованию и получению требуемых показателей качества обрабатываемых поверхностей. Существует большое разнообразие способов галтовки. Это способы галтовки в барабанах с горизонтальной и наклонной осью вращения. Цель операции галтовки в данном случае - это притупление острых граней и придание заготовкам гладкой формы. Обработка при этом производится перемешиванием и смешиванием заготовок и абразивной массы. Процессы взаимодействия обрабатываемого материала с зернами абразива сходны с процессами абразивной обработки при шлифовании, полировании, доводке. Процессы абразивной обработки исследовались многими учеными, в том числе Бароном Ю.М, Брандтом В.И, Гребенщиковым И.В, Качаловым Н.Н, Кедровым С.М, Кузнецовым С.М., Кремень З.И, Орловым П. Н, Панасовым П.П , Раш И, Сорокиным В.М, Сакулевичем Ф.Ю, Честновым А.О, Шубниковым А.В, Щеглом М.Я., Ящерицыным и др.

Анализируем основные способы галтовки самоцветных камней с целью определения преимуществ и недостатков этих способов, а также их возможности и области применения.

### **1.2.1. Галтовка в барабанах с наклонной или горизонтальной осью вращения**

Наибольшее распространение при изготовлении ювелирных изделий из самоцветных камней получили методы галтовки в барабанах с горизонтальной или наклонной осью вращения. Частота вращения барабана и относительные скорости скольжения изделий по барабану при этом невысокие. Силы взаимодействия ограничиваются силами тяжести. При обработке обрабатываемые изделия и абразивную массу загружают навалом. Обработка происходит при вращении барабана и относительного движения заготовок в

абразивной среде. Поскольку из-за специфики данного процесса частота вращения ограничена, соответственно скорости и силы взаимодействия малы.

Производительность и качество обработки при данном способе обработки зависят от ряда факторов, основные которые: частота вращения барабана, коэффициент трения между заготовок, также между заготовок со стенками барабана, количество абразива и его зернистости, соотношение объема загружаемой массы и объема барабана, продолжительность обработки. Недостатком данного способа является невозможность исправления формы деталей.

Съем происходит по всей поверхности и неуправляемый. Данный способ при изготовлении шаровидных изделий из самоцветных камней можно использовать на первой стадии формообразования кубиков в шарики для снятия углов и острых граней. [5,6,7,8].

### **1.2.2. Метод вибрационной обработки заготовок**

При вибрационной обработке рабочей камере, где находятся обрабатываемые заготовки и абразивные материалы, сообщается вибрация определенной амплитуды и частоты и направления. При этом гранулы абразива и детали получают направленное перемещение и микроКолебания с частотой равной частоте вибрации. Гранулами абразива на поверхности обрабатываемых деталей наносится большое число микроударов. При сухой обработке съем металла производится за счет механического воздействия частиц абразива. При обработке в жидкой среде происходит одновременно механическое и квантационное воздействие частиц абразива. На рисунке 1 приведена схема вибрационной обработки.

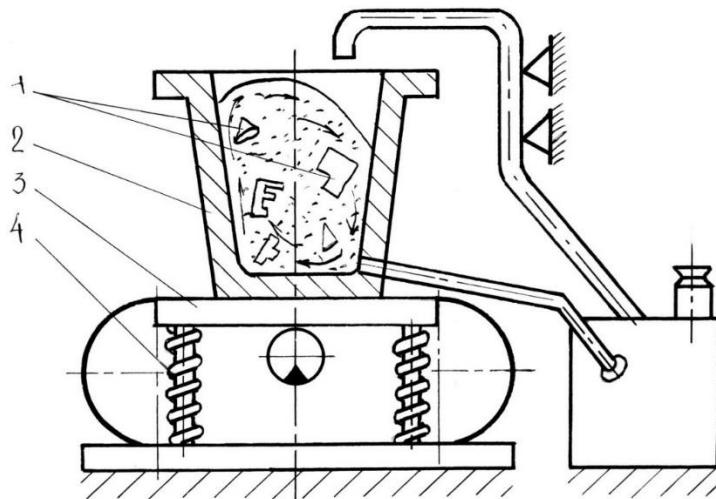


Рис.1.1. Схема устройства для вибрационной обработки деталей

На рисунке 1.1. показаны обрабатываемая деталь 1, рабочая камера 2, платформа для установки рабочей камеры, пружины вибропривода. В качестве привода в них используют электромагнитные, дисбалансовые, пневматические и гидравлические вибраторы.

Устройство работает следующим образом: в начале детали 1 и абразивную массу загружают в рабочий контейнер 2. Контейнер 2 устанавливается на рабочей платформе 3. Платформе, установленной на пружинах 4, сообщаются колебательные движения от вибропривода. При включении устройства загрузочная масса (детали, абразив, рабочая жидкость) получает колебательные движения с частотой в интервале  $f_k = 15..50$  Гц и амплитудой в пределах  $A = 0,5...9$  мм.

Зернистость абразива выбирается исходя из требования к качеству поверхности. При полировке вместо свободного абразива могут быть использованы полирующие тела различной формы.

При вибрационной обработке производительность и качество обработки зависят от частоты и амплитуды колебания рабочего контейнера, механических свойств обрабатываемых деталей, а также продолжительности обработки и характеристики абразива [9,10,11,12,13].

Скорости гранулы абразива при обработке составляют 0,3...1 м/с, при этом их ускорение доходит до 20...150 м/с<sup>2</sup>. За счет большого ускорения силы

микроударов гранулы абразива по поверхности составляют 1,5...30Н., что достаточно для вырывания материала заготовки.

Данный способ обработки имеет низкую производительность. Его можно использовать в финишных операциях для обеспечения требуемой шероховатости поверхности.

### 1.2.3. Центробежно-ротационная обработка заготовок

Для повышения силы взаимодействия деталей с абразивом и улучшения качественных показателей обработанных поверхностей используются силы инерции, возникающие за счет сообщения деталей кругового движения. Возникающие инерционные силы возрастают по мере увеличения скорости вращения дна барабана. Прижимаются абразивные зерна к обрабатываемым поверхностям деталей. При вращении абразивной массы под влиянием возникающих инерционных сил формируются торOIDальные потоки из загрузочной массы и обрабатываемых деталей.

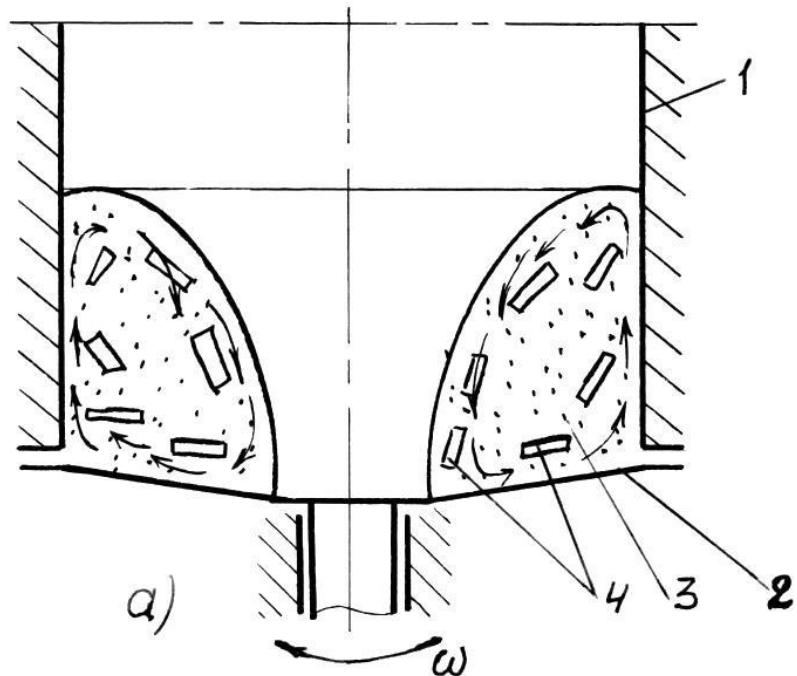


Рис. 1.2. Устройство для центробежно-ротационной обработки деталей.

Устройство для центробежно-ротационной обработки состоит из рабочего контейнера 1, дно 2 которого выполнено отдельно, и имеет привод вращения. Перед обработкой абразивные материалы 3 и заготовки 4 загружают в контейнер. При обработке под воздействием вращающегося дна контейнера заготовки и абразивные материалы приводятся во вращательное движение. Скорость относительного скольжения заготовок по поверхности дна и стенки при этом на порядок выше, чем при традиционной галтовке. Сила, действующая на детали, при этом на 7-10 раз выше, чем при вибрационной обработке. Производительность обработки также вырастает соответственно увеличению силы взаимодействия.

Экспериментально установлено, что частота оборотов ротора должна составлять 6-40 рад/с. Оптимальная величина загрузки рабочей камеры составляет 50-70% от объема камеры.

Исходя из особенности конструкции устройства к обрабатываемым изделиям и грануляции шлифовального материала предъявляются требования, чтобы их размеры были больше зазора между стенкой контейнера и ротора. В среднем размеры деталей не должны быть менее 4-5мм. Преимуществом данного способа является его высокая производительность. Производительность обработки при этом выше производительности барабанной галтовки в 15 раз и вибрационной обработки более чем в 30 раз.

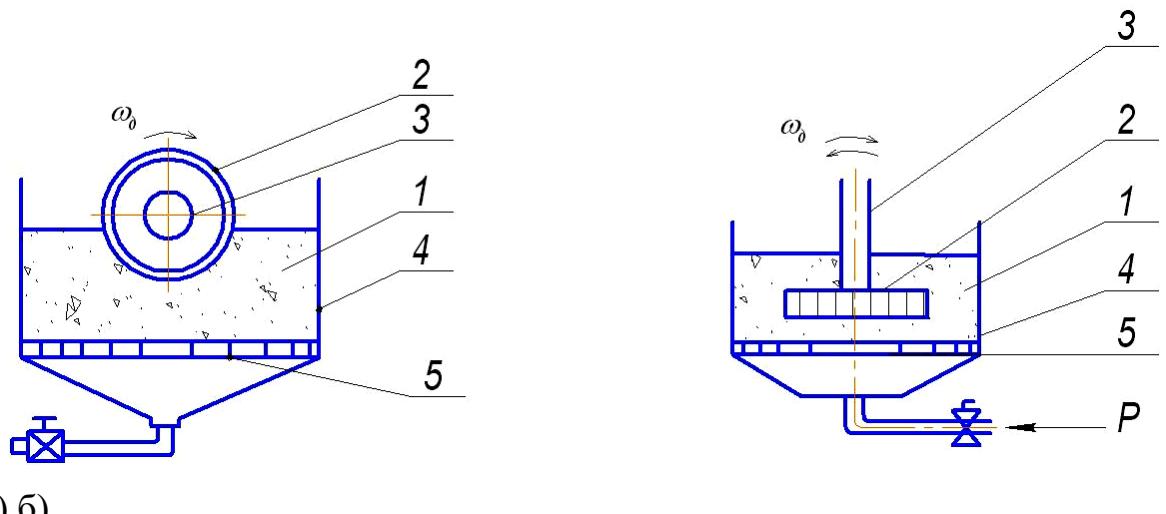
Проводилось исследование шероховатости обрабатываемых поверхностей, обработанных на центробежно-роторном станке, в зависимости от продолжительности обработки. Установлено, что в первые минуты обработки происходит интенсивное снижение шероховатости. При использовании данного способа можно формировать шероховатости до шероховатости  $R_a=0,8$  мкм.

Преимуществом данного способа является высокая производительность и возможность формообразования поверхности тел вращения. Этот метод, например, можно использовать для округления граней и вершин исходных заготовок в виде кубиков, нарезанных из самоцветных камней [14,15].

## 1.2.4. Турбоабразивная обработка поверхностей деталей

Турбоабразивный метод применяют при обработке крупногабаритных и массивных деталей. При этом обрабатываемая деталь 1 закрепляется на шпинделе 2 (рисунок 1.3а). Детали сообщается вращательное движение. Соприкасаясь с потоком абразивных частиц, поверхность очищается и снижается ее шероховатость.

Этот метод в основном применяется для отделочной обработки деталей со сложным профилем. Обработка происходит в потоке абразивных частиц, приведенного сжатым воздухом в псевдоожженное состояние. Обработка происходит при одностороннем или реверсивном вращении детали (рисунок 1.3а и 1.3б). При обработке деталь 2, установленную на шпинделе 3, погружают в шлифовальный материал 1 (рисунок 1.3б).



а) б)

Рис. 1. 3. Принцип работы устройства при турбоабразивной обработке.

- Обработка при одностороннем вращении детали, при неполной ее загруженности;
- Обработка при реверсивном вращении детали при полной загруженности.

Для повышения подвижности и оживления шлифовального материала используется специальная решетка 5, через которую подают сжатый воздух 26.

Под действием потока воздуха масса, состоящая из частиц частицы абразива, становится текучей и приобретает свойства жидкости.

При данном процессе производительность и качество обработки зависят от множества факторов, в том числе: зернистости абразива, соотношения массы абразива и обрабатываемых изделий, продолжительности обработки, линейной скорости изделий при обработке и т.д. Наиболее оптимальные режимы обработки при данном процессе следующие: линейная скорость изделий 15..20 м/с, режущий материал шлифзера №от 16 до 20, продолжительность обработки от 1 до 5минут. Снимаемый слой при этом незначительный, поэтому данный способ в основном применяют при финишной обработке. Данный способ в основном используется для обработки крупногабаритных изделий. При обработке самоцветных камней такими изделиями являются различные вазы, чаши и др. из самоцветных камней [16,17,18].

### **1.2.5. Магнитно-абразивная обработка поверхностей деталей**

Режущими элементами при магнитно-абразивной обработке являются специальные ферромагнитные абразивные порошки. Они получаются путем спекания смеси порошка железа и абразива. Их также называют керметами. Схема работы устройства для магнитно-абразивной обработки показана на рисунке 1.4.

Частицы, выполняющие функции абразива, имеют магнитные свойства. Эти частицы под действием магнитного поля прилипают к магнитным полюсам, образуя своеобразную упругую подушку.

При вращении детали 2, находящейся между полюсами, происходит их взаимодействие с абразивом, удерживаемым магнитным полем. За счет относительного перемещения частиц абразива по поверхности детали происходит съем материала. Для интенсификации процесса обработки деталям также сообщается осциллирующее движение вдоль оси.

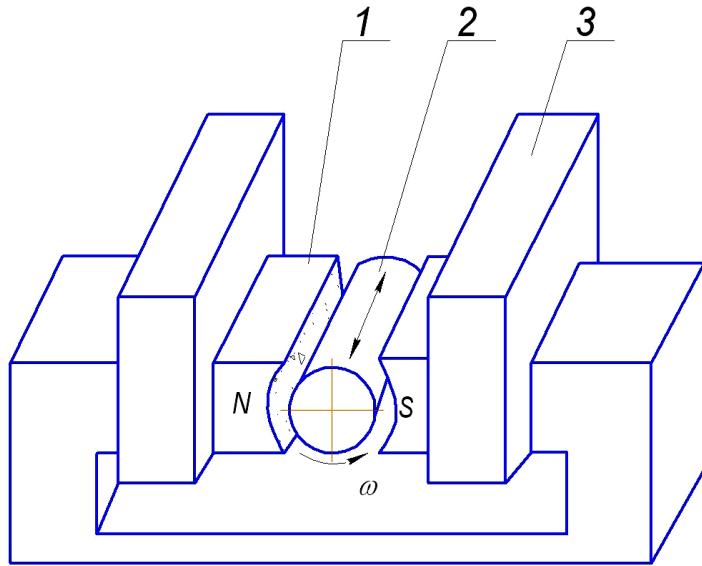


Рисунок 1.4. – Принцип работы устройства для магнитно-абразивной обработки деталей

При исходной шероховатости равной 0,25-0,63 мкм. применением данного способа обработки можно получить шероховатость поверхности  $Ra = 0,16-0,04$  мкм. Применяя способ магнитно-абразивной обработки, можно снять тончайшие припуски в пределах 5-30 мкм. Поэтому данный метод можно использовать на финишных операциях для получения поверхностей высокого качества. [19].

Данный способ обработки в основном применяется для выполнения операции финишной обработки как плоских поверхностей, так и наружных цилиндрических и фасонных поверхностей тел вращения. Производительность процесса и качество обработанных поверхностей зависят от формы и радиуса профиля рабочих поверхностей инструментов в виде наконечников магнитных полюсов. На рисунке 1.5 показаны формы полюсных наконечников. Как видно из рисунка, зазоры выполняются прямоугольными (рис.1.5а), эквидистантными(рис.1.5б), серповидными (рис.1.5в)

При прямоугольном зазоре, когда обрабатывается, деталь имеет форму тел вращения, качество обработки нестабильное. Это связано с тем, что часть зерен кермета выбрасывается из зазора. При эквидистантном зазоре выброс зерен абразива минимальный, поэтому достигаются высокая производительность обработки и качество поверхности. При серповидном зазоре условия для удержания кермета в зоне обработки наиболее подходящие, поэтому

обеспечивается более высокая производительность по сравнению с другими формами наконечников. В тоже время изготовление зазора серповидной формы сложнее по сравнению с прямоугольной или эквидистантной.

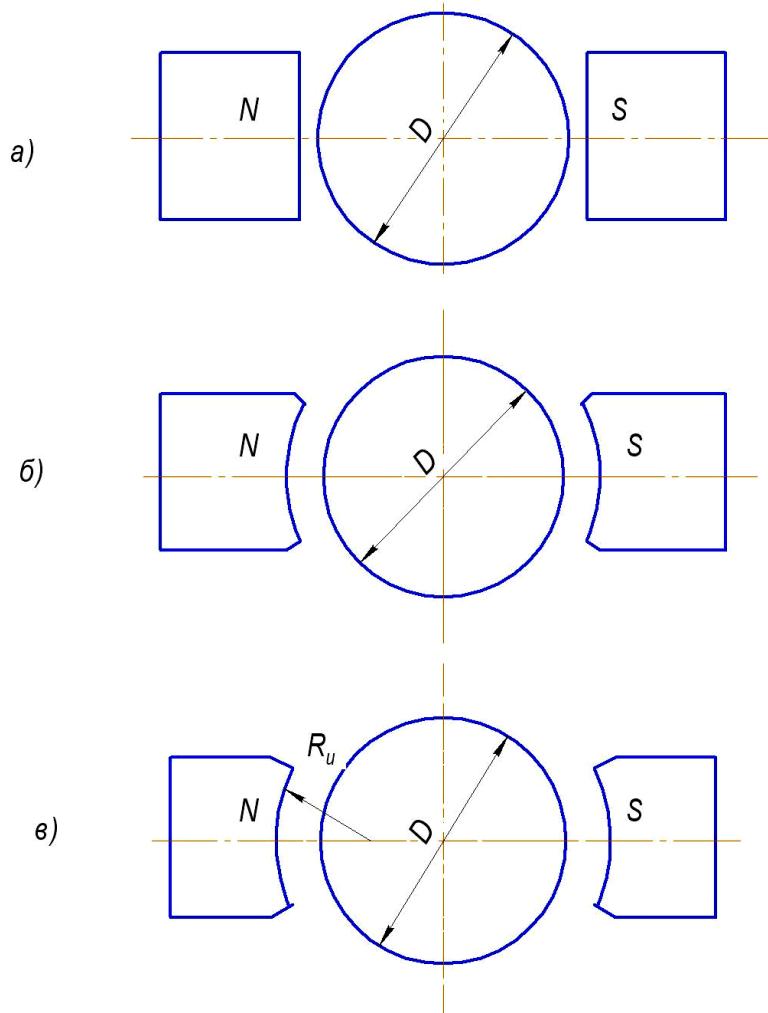


Рис. 1.5. – Форма наконечников, используемых при магнитно-абразивной обработке

Магнитно-абразивный способ обработки можно использовать при изготовлении крупногабаритных изделий. На этой основе также можно создавать станки, которые производят избирательную обработку отдельных поверхностей [20,21,22,23,24].

Недостатки магнитно-абразивной обработки деталей, усложняющие его широкое применение, следующие:

-когда при обработке наружных цилиндрических поверхностей значение биения детали превышает 0,05мм или глубина профиля фасонной поверхности больше 5мм форма профиля детали при обработке искажается;

-применяемые при обработке ферроабразивные материалы (керметы) сложны в изготовлении;

-магнитные системы, применяемые на этих устройствах, сложны в изготовлении.

### **1.2.6. Финишная обработка деталей уплотненным потоком абразивных частиц**

При обработке деталей уплотненным потоком абразивных частиц также используются действия инерционных сил. В этом случае центробежные силы инерции прижимают абразивную массу к внутренней поверхности вращающегося барабана 1. Абразивная масса при этом создает уплотненный поток, вращающийся вместе с барабаном. На рисунке 1.6. приводится схема устройства для обработки деталей уплотненным потоком абразивных частиц.

Обрабатываемая деталь 2 устанавливается и закрепляется на оправке шпинделя 3. Деталью посредством шпинделя сообщается вращательное движение и перемещение в поперечном и продольном направлениях. Вращательное движение детали и его перемещения осуществляются посредством автономного приводного двигателя. Уплотнений поток абразива создается следующим образом. Посредством эжектора 4 из бака 5 абразивная суспензия подается во вращающийся барабан 1. Абразивная составляющая суспензия под действием центробежных сил, заполняя внутреннюю полость барабана, создает уплотненный абразивный слой 6. Данный слой обладает упругостью, поэтому копирует заданную форму профиля заготовки и обеспечивает равномерную обработку. Установлено, что глубина фасонного профиля не должна превышать 2-5мм. Когда глубина фасонного профиля превышает 5мм, съем происходит неравномерно и профиль детали искажается.

Обрабатываемая деталь при продольном перемещении вдоль оси барабана вводится в барабан. При поперечном перемещении происходит погружение обрабатываемой детали в упругий уплотненный слой абразива. Для качественной обработки деталей необходимо обеспечить одинаковое контактное давление абразива по обрабатываемой поверхности.

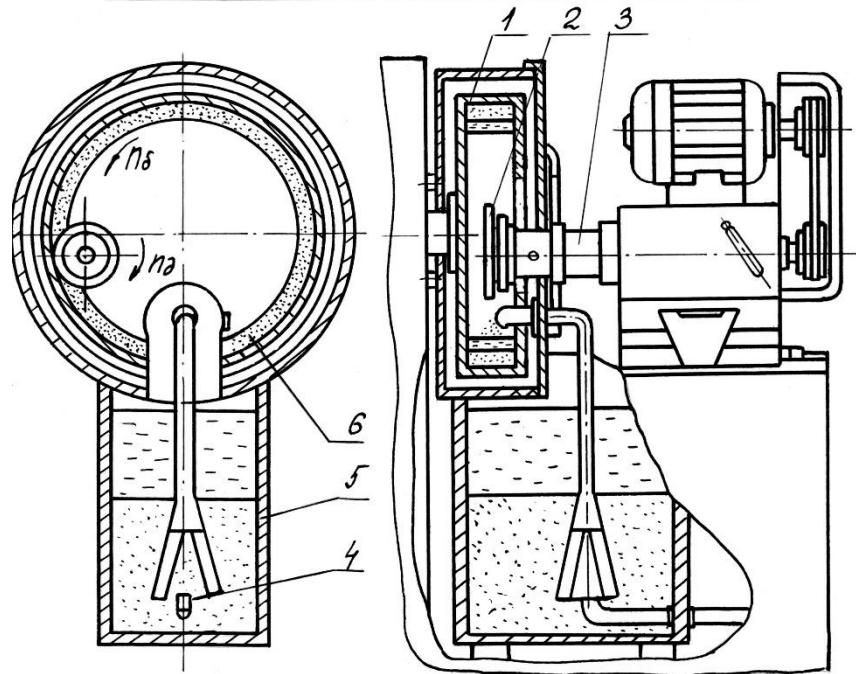


Рисунок 1.6. – Схема устройства для обработки деталей уплотненным потоком абразивных частиц.

Для деталей, имеющих фасонные поверхности, это задача усложняется. Для обеспечения одинакового контактного давления абразивных частиц на обрабатываемую поверхность необходимо трансформировать массу частиц абразива в плотный упругий слой, копирующий профиль детали [25,26].

### 1.2.7. Центробежно-планетарная обработка

Галтовочные станки барабанного типа широко применяются при изготовлении изделий из самоцветных камней. На этих станках обработка производится за счет перемешивания загрузочной массы под действием силы тяжести.

Этот метод имеет низкую производительность. Преимуществом данного способа обработки является то, что поломки и трещины при обработке минимальны. Малая производительность, невозможность одновременной

обработки камней с различными свойствами, особенно по твердости, являются основными недостатками данного процесса. В данной работе исследованы возможности применения более производительного способа галтовки самоцветных камней с использованием планетарно-центробежных станков.

Производительность обработки при этом существенно возрастает. Это объясняется тем, что при обработке смещивание и перемещение загрузочной массы происходит под действием центробежных сил инерции, а величина этих сил многократно превосходит значения силы тяжести.

Для исследования процесса обработки использовали специальный станок, показанный на рисунке 1.7 [3, 4]. Данный станок имеет пять барабанов, совершающих планетарные движения: вращение планшайбы вокруг центральной оси и одновременное вращение барабанов вокруг своих осей. В данном станке частоты вращения планшайбы и барабанов можно регулировать.

На рисунке 2. показана схема рабочей части данного станка. Контейнер 1 является рабочим органом. Контейнер совершает планетарное движение - вращение вокруг центральной оси  $O_1O_1^1$  и одновременное вращение вокруг собственной оси.



Рис. 1.7. Станок планетарно-центробежный для обработки самоцветных камней

В контейнерах 1 загружают заготовки 2 и абразивную суспензию. Контейнер 1 вставной. После загрузки вместе с загрузочной массой его вставляют в стакан 3. Стакан вместе с заготовками приводится во вращательное

движение посредством планшайбы 4, оси 5, системы зубчатых колес 6 и 7.

Планшайба совершает вращательное движение относительно оси  $O_1O_1^1$ .

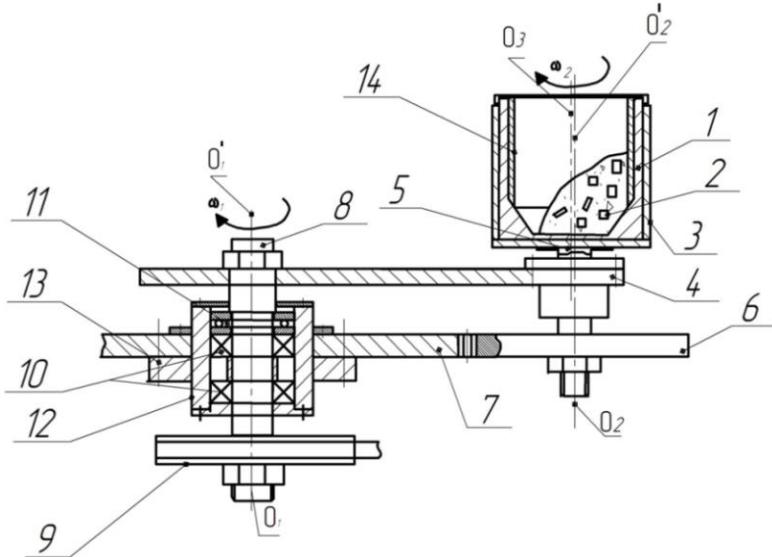


Рис. 1.8. Схема рабочей части станка 1 для планетарно-центробежной обработки самоцветных камней 1

Планшайбе сообщается вращательное движение от вала 8. Валу 8 вращательное движение сообщается от ременной передачи и шкива 9.

Шкиву 9 посредством ременной передачи передается вращательное движение от электродвигателя, имеющего систему регулирования частоты (на рисунке не показано). Вал 8 при помощи радиальных подшипников 10 и упорного подшипника 11 установлен в корпусе 12, монтированный в станине 13. Для интенсификации процесса съема внутри контейнера 1 монтируется втулка 14 с абразивным покрытием. Контейнеру 1 сообщается одновременное вращательное движение вокруг осей 1  $O_1O_1^1$  и  $O_2O_2^1$ . Для интенсификации процесса обработки ось  $O_2O_2^1$  располагают с некоторым смещением (3-7мм) относительно оси симметрии емкости. Для этого используют специальную эксцентричную втулку 14. Для обеспечения циркуляции загрузочной массы в вертикальной плоскости нижняя часть внутренней полости емкости изготавливается конусной.

Количество емкостей можно менять. Данная установка рассчитана с количеством емкостей от 2 до 6. На рисунке 1.7 показана установка с 5 емкостями.

Действие сил при обработке на данном станке показано на рисунке 1.9. Эти силы следующие: центробежная переносная сила инерции-  $F_{\text{ц}}^e$  – от вращения вокруг оси  $O_1O_1^1$ ; центробежная относительная сила инерции от вращения стакана вокруг оси  $O_2O_2^1$ - $F_{\text{ц}}^r$ ; и кориолисова сила инерции-  $F_k$  и сила трения со стенками барабана-  $F_{\text{тр}}$ .

Направление действия этих сил зависит от месторасположения заготовок в контейнере.

Когда значение  $F_{\text{ц}}^e > F_{\text{ц}}^r + F_k$ , заготовки под действием этой силы прижимаются в определенной части контейнера (рис.1.9). Под действием силы трения со стенкой контейнера происходит смешивание заготовок и абразивной массы. При обработке хрупких камней для предотвращения их поломки и исключения появления трещин необходимо устранить разбег и соударение заготовок, что достигается выбором режимов обработки, при которых значение-  $F_{\text{ц}}^e$  больше значения  $F_{\text{ц}}^r + F_k$ .

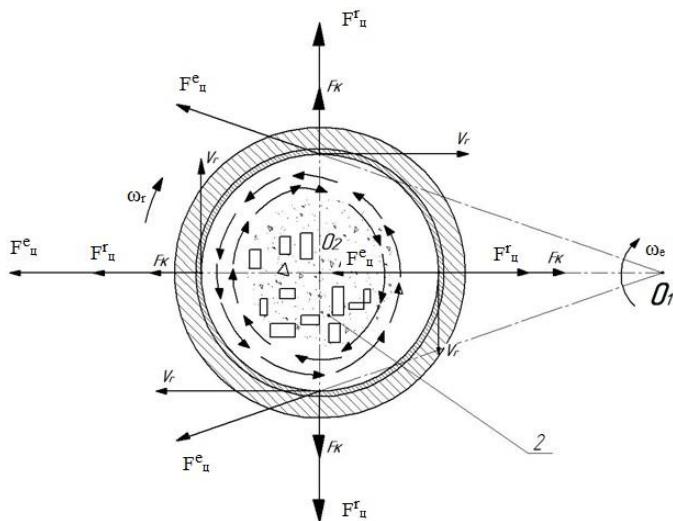


Рис. 1.9. Действия сил при планетарной центробежной обработке

Эксперименты показали, что соударение можно уменьшить также увеличением объема загрузки контейнера. Наилучшие результаты достигались при загрузке 0,6 объема контейнера. Дальнейшее увеличение объема не влияет на уменьшение поломки, но снижает производительность (рис. 1.10)

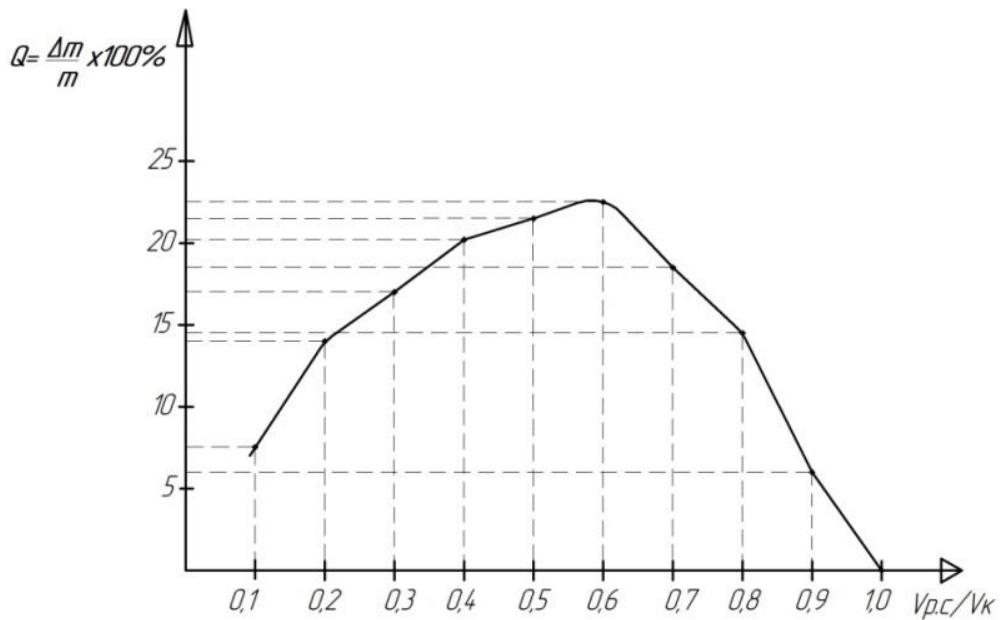


Рис. 1.10. График влияния объема заполнения котейнера на производительность обработки

Производительность процесса при планетарно-центробежной обработке зависит от режимов обработки, также условий проведения обработки. На рисунке 1.11 приведены результаты эксперимента при различных условиях обработки. Из графика видно, что при обработке в жидкой среде производительность выше, чем при сухой обработке. На производительность влияет также наличие абразива. В интервале обработки равной 10-60 мин производительность имеет линейную зависимость от времени обработки. Интенсивность съема при этом различно при разных условиях обработки. Например, при обработке в водной среде без абразива производительность более чем в 5 раз по сравнению с сухой обработкой без абразива. При добавлении абразива в водной среде производительность обработки возрастает. Например, при количестве абразива 20гр на килограмм массы заготовок потеря исходной массы составляет 30 % , при абразиве 5 гр на килограмм массы заготовок 24% , при отсутствии абразива - 14% .

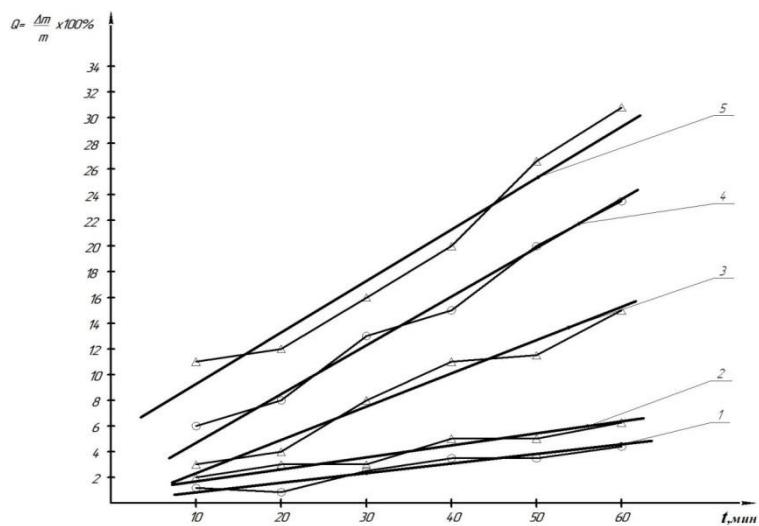


Рисунок 1.11. Влияние условия обработки на величину съема при планетарно-центробежной обработке.

1. Сухая обработка без абразива; 2. Сухая обработка при количестве абразива 5г/кг; 3.Обработка в водной среде без абразива; 4. Обработка в водной среде с добавлением 5г/кг абразива; 5.Обработка в водной среде с добавлением 20г/кг абразива.

Как следует из результатов эксперимента, производительность обработки в жидкостной среде при одинаковых других условиях выше, чем при обработке всухую. Повышение производительности в жидкостной среде 4 объясняется наличием квитанционного износа при обработке. В рассматриваемых пределах производительность обработки от продолжительности обработки имеет линейную зависимость  $-Q= f(t)=0,5+0,072 t$ .

Зависимость продолжительности обработки от частоты вращения планшайбы также линейная -  $Q= f(n)=2,09+0,0167 n$ .

На рисунке 1.12 приведено сравнение различных способов обработки самоцветных камней по производительности. Единица оценки производительности обработки- г/кг мин. Это величина съема с 1 кг массы обрабатываемой заготовки в течение одной минуты. Как видно из рисунка 1.12, величина съема при центробежной галтовке выше барабанной галтовки более чем в 5 раз. Другое преимущество планетарно-центробежной галтовки заключается в том, что в отдельных

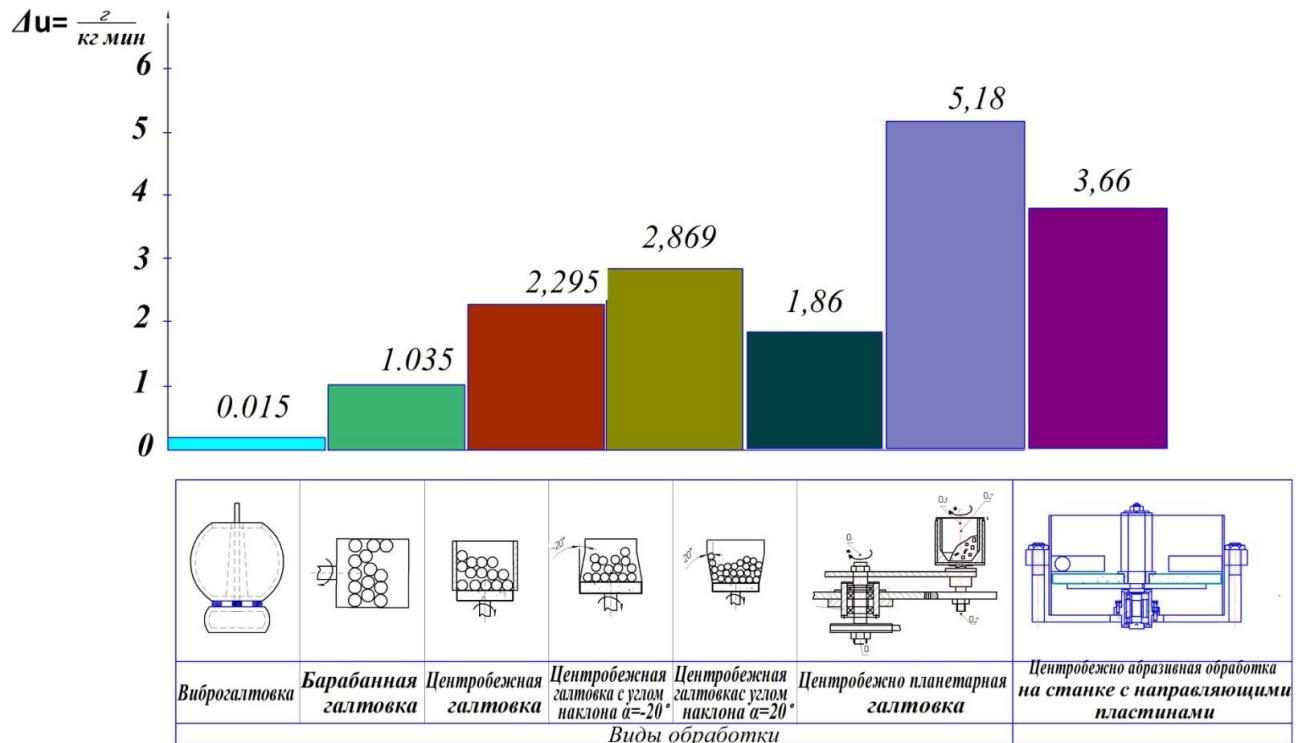


Рис. 1.12. Сравнение видов галтовки по производительности

контейнерах можно одновременно обработать камни с различными физико-химическими свойствами, например, разные твердости, и в относительно короткие сроки обрабатывать большую партию разнообразных изделий. Данный способ обработки наиболее эффективен при большой номенклатуре изготавляемых изделий, какими являются изделия ювелирного производства [28,29,30,31].

### 1.3. Способы применения центробежной абразивной обработки при изготовлении шариков из самоцветных камней

Методы центробежной абразивной обработки широко применяются для выполнения таких операций, как отчистка поверхностей, снятие заусенцев, снижение шероховатости поверхности, округление острых граней и углов. Существуют различные методы центробежной абразивной обработки, отличающиеся кинематикой станков и конструкциями оборудования, [36,37,38,39, 40,41,42,43,44,45].

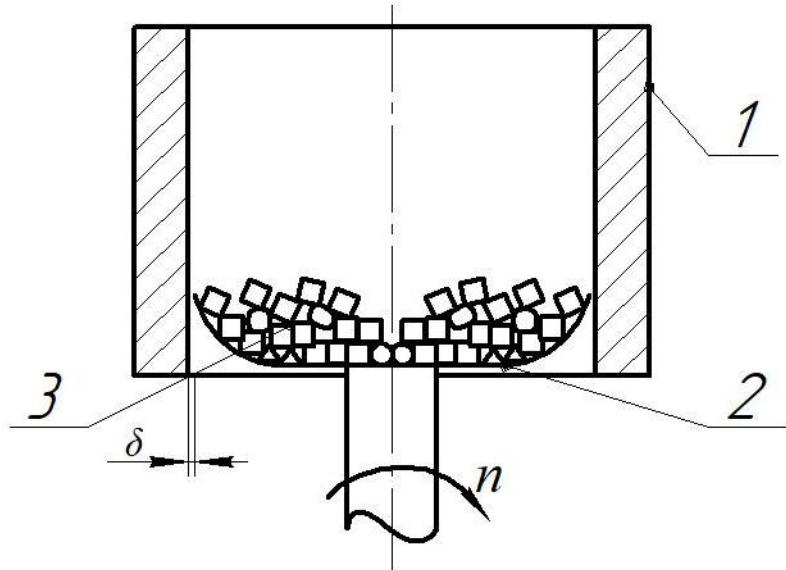


Рис. 1.17. Схема устройства для центробежной абразивной обработки

Основные методы центробежной абразивной обработки показаны на рисунках 1.17...1.25. На рисунке 1.17 заготовки загружаются в барабан, дно которого установлено с некоторым зазором относительно барабана, и получает вращательное движение вокруг собственной оси. В качестве дна можно использовать абразивный круг. Вращение круга передается от отдельного привода (на рисунке не показано). При вращении круга обрабатываемые детали получают вращательное движение и под воздействием центробежной силы прижимаются к неподвижной стенке и теряют скорость. Когда количество деталей много, они получают торOIDальное движение. Верхние заготовки, соприкасаясь с барабаном, подымаются на некоторую высоту и, теряя скорость, падают вниз. Обработка в данном случае производится закрепленным абразивом.

На рисунке 1.18 показана схема обработки, в которой барабану с коническим дном сообщается вращательное движение вокруг вертикальной оси. Под действием центробежной силы загрузочная масса приобретает торOIDальную форму и совершают сложное движение в вертикальной плоскости. Скорость перемещения различных слоев отличается. За счет разности скоростей относительного движения происходит активное смещивание деталей и абразивной массы и соответственно обработка заготовок.

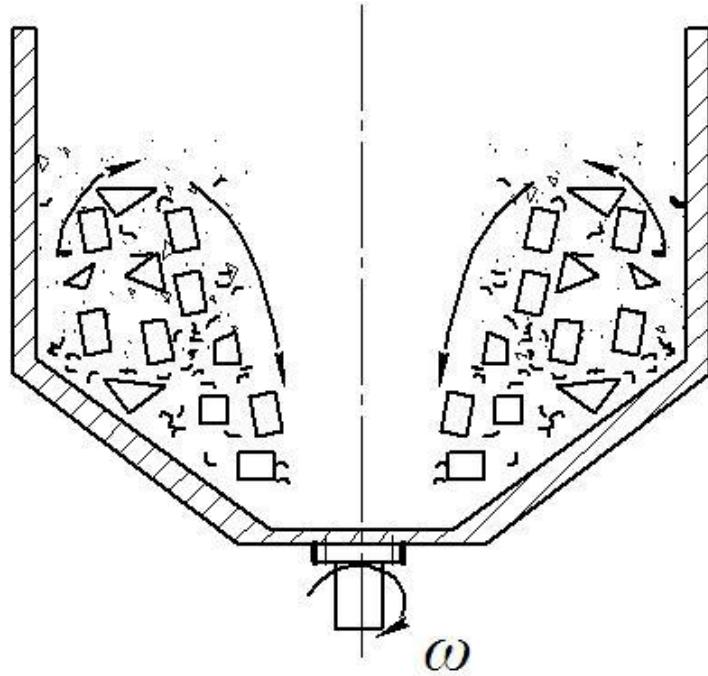


Рис. 1.18. Центробежная абразивная обработка на барабанах, ось вращения которой совпадает с осью симметрии

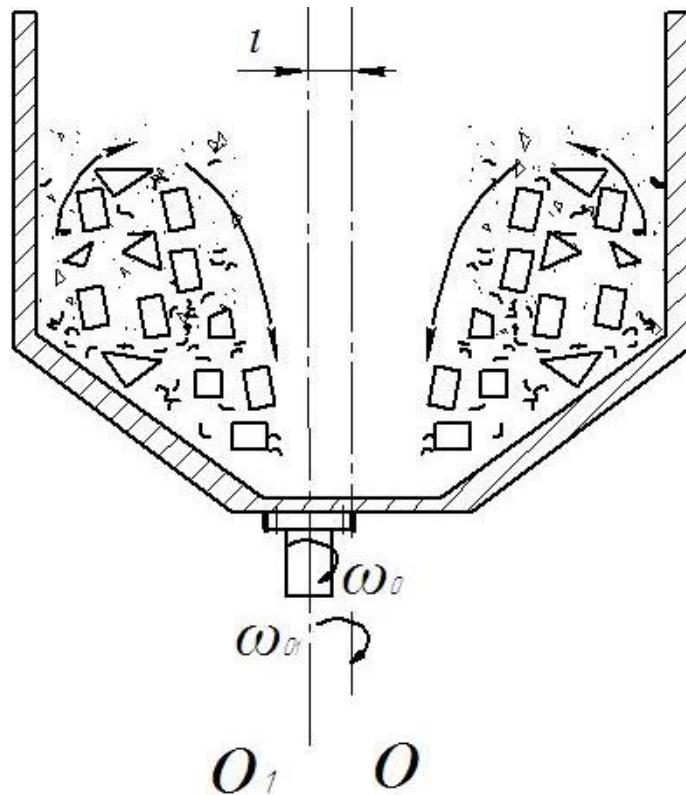


Рисунок. 1.19. Центробежная абразивная обработка на барабанах с эксцентрично-расположенной осью вращения

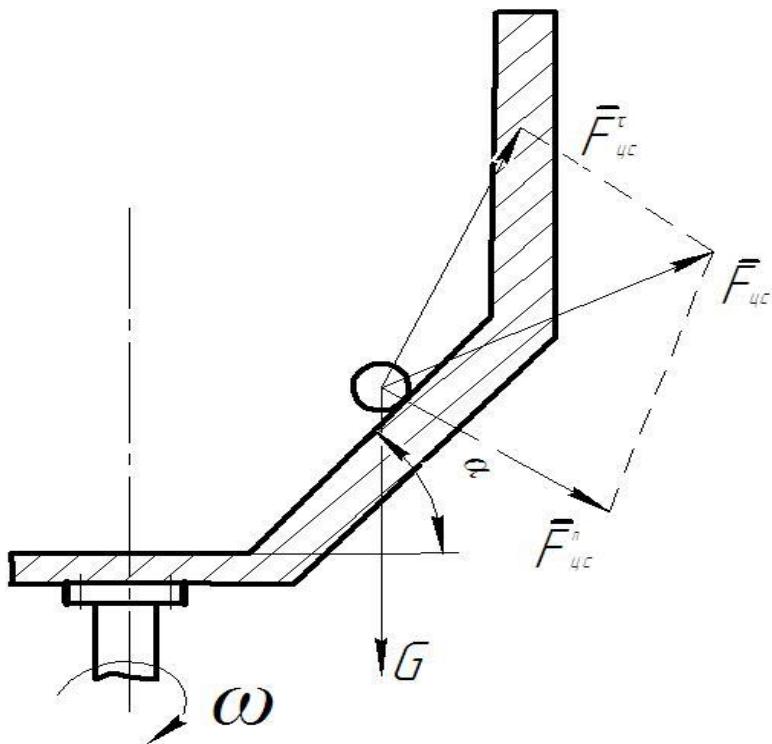


Рис. 1.20. Действия сил при обработке на барабанах с коническим дном

При обработке требуется обеспечить условия для активного перемешивания деталей и абразивной массы. Это возможно в том случае, когда под воздействием центробежной силы инерции заготовки поднимаются вверх. Перемещение заготовок по конической части барабана вверх происходит, когда проекция центробежной силы в вертикальной плоскости больше чем значение силы тяжести.

Это условие следующее:

$$F_{u.c.}^{\tau} > G \cdot \sin \alpha \quad (1.2)$$

$$F_{u.c.}^{\tau} = F_{u.c.} \cdot \cos \alpha \quad (1.3)$$

В выражениях 1.2 и 1.3, приравнивая правые части, получим:

$$F_{u.c.} > \frac{G \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (1.4)$$

$$\left. \begin{array}{l} F_{u.c.} = m \cdot \omega^2 \cdot R \\ G = m \cdot \omega \end{array} \right\} \quad (1.5)$$

Значение  $F_{u.c.}$  и  $G$  из 1.5, подставляя в 1.4., получим

$$\omega > \sqrt{\frac{g \cdot \operatorname{tg} \alpha}{R}} \quad (1.6)$$

Таким образом, при значениях  $\omega$  больше чем расчетное условие перемещения заготовок выполняется. Под воздействием центробежной силы инерции и силы трения загрузочной массе сообщается одновременное движение в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Недостатком данного способа обработки является низкая производительность вследствие малой подвижности заготовок в горизонтальной плоскости. На рисунке 1.19 представлена схема обработки, в которой ось симметрии емкости и ось его вращения не совпадают. При вращении барабана за счет эксцентричности оси вращения барабана заготовкам придается дополнительное микропреремещение, что повышает производительность процесса.

На рисунке 1.21 показана обработка в барабане с вращающимся дном. При этом загрузочной массе сообщается движение в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

На рисунке 1.22 показана схема обработки в барабане с вращающимся сферическим дном. Преимуществом данного способа является увеличение контактной площади вращающейся сферической чаши 1 с заготовками. [46,47,48,49,50,51,52].

Наиболее высокая производительность и качество обработки имеют место, когда вращается только дно барабана, а его стенки неподвижны.

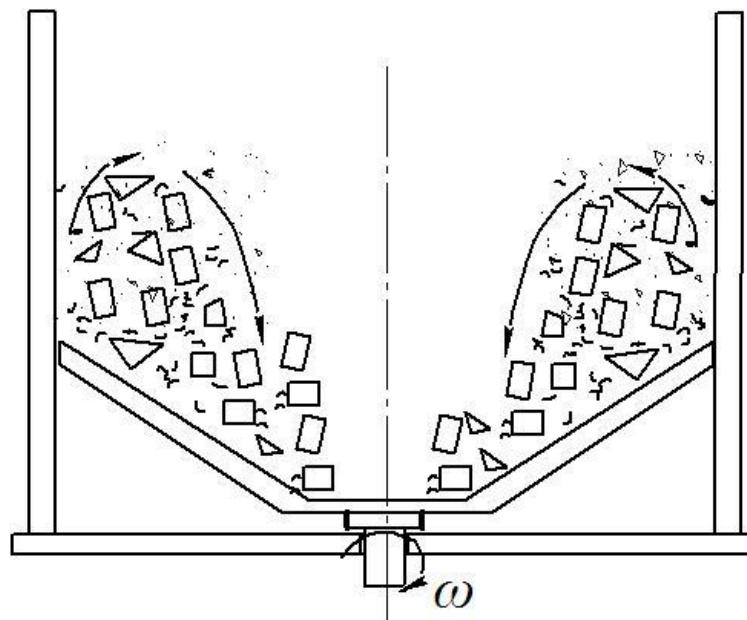


Рис. 1.21. Обработка на барабанах с коническим вращающимся дном

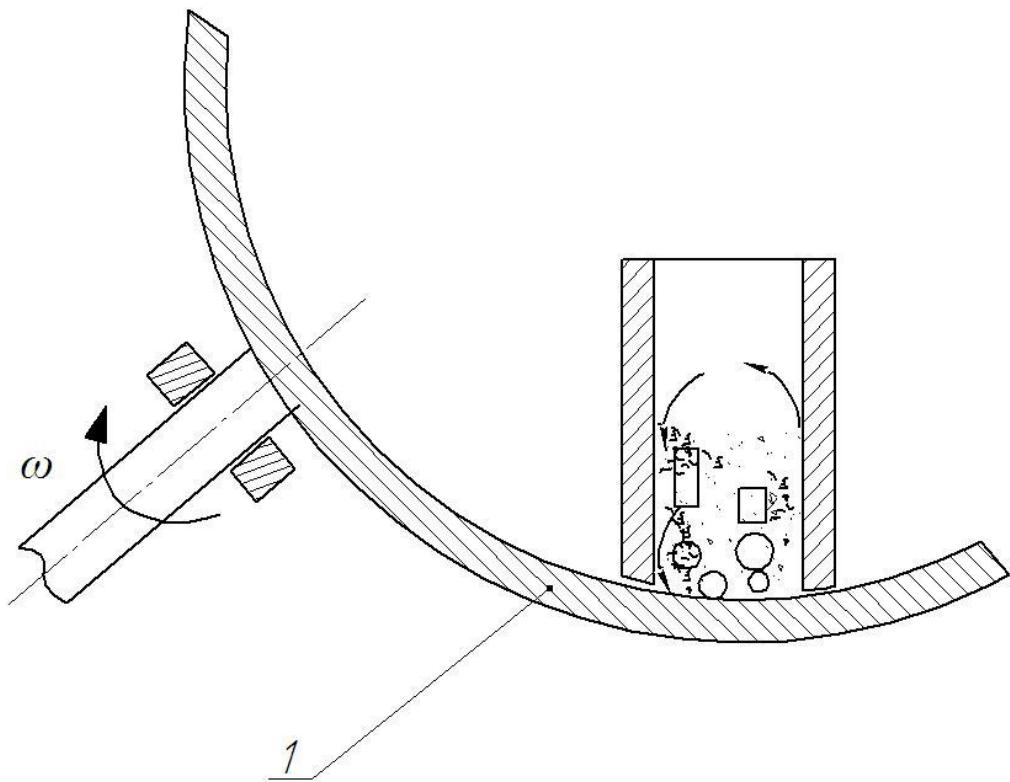
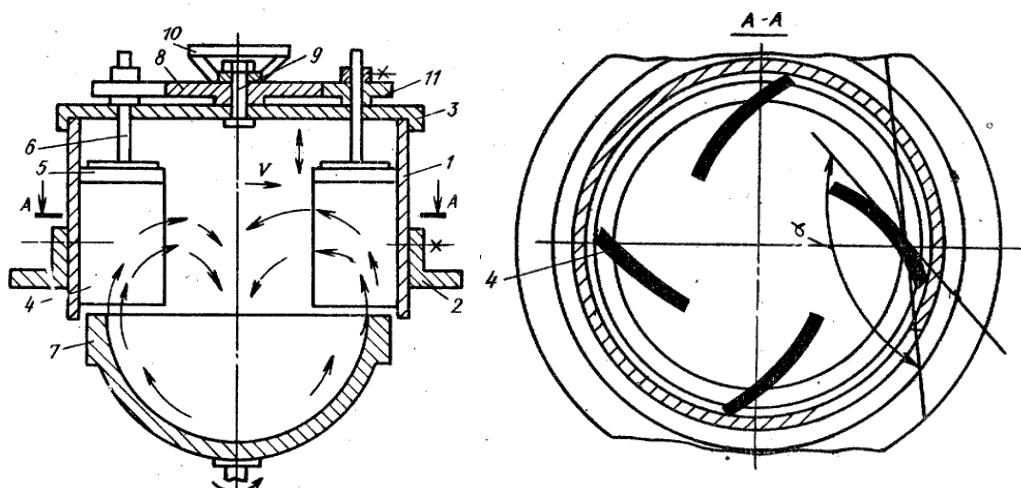


Рис. 1.22. Обработка на барабанах со сферическим вращающимся дном

Рассмотрим наиболее широко применяемые способы центробежной абразивной обработки с вращающимся дном и неподвижной стенкой. Один из этих способов - это обработка в контейнерах с вращающимся дном [82, 83]. При данном способе обработки рабочая загрузка совершает сложное пространственное движение. Обработка производится вследствие трения и скольжения заготовок и абразивной массы. Соответственно, чем значительнее

скорость взаимного скольжения абразив-заготовка, тем выше производительность обработки.

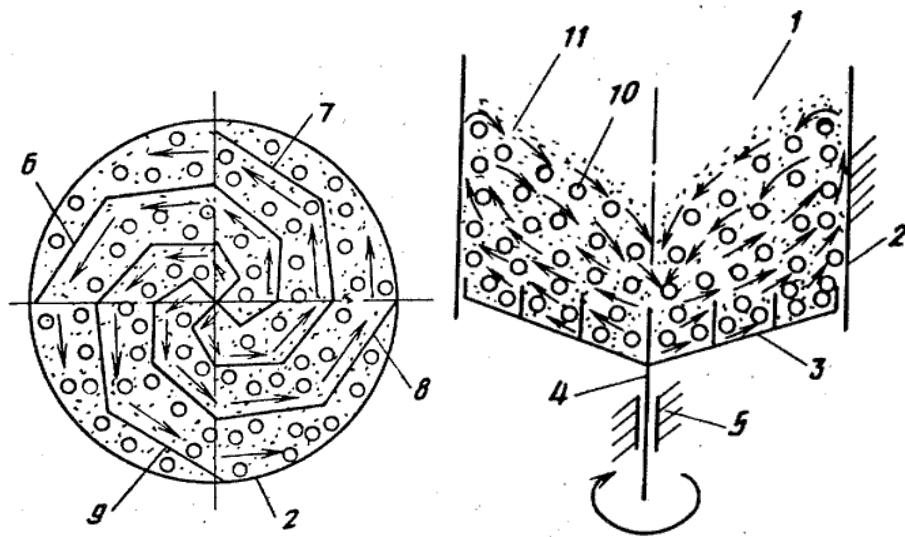
В другом устройстве, показанном на рисунке 1.23, применяется следующая схема обработки [82]: вследствие вращения дна под воздействием центробежных сил, действующих на заготовки и абразивную массу, они, перемещаясь по криволинейному профилю дна, поднимаются вверх. Цилиндрическая часть контейнера состоит из вращающейся и неподвижной части. Заготовки поднимаются вверх, взаимодействуя с неподвижной цилиндрической чашей контейнера, имеющей вертикальные пластины криволинейного профиля, замедляют ход и обратно падают в контейнер.



**Рис.1.23. Устройство для центробежной абразивной обработки с неподвижной верхней частью**

Обработка происходит за счет относительного движения заготовок и абразивной массы при их перемещении по контейнеру. Недостатком данного устройства является низкая производительность обработки и невозможность управления формой обрабатываемых заготовок. Область использования данного оборудования – это удаление заусенцев и округление острых кромок заготовок.

В другом устройстве, предназначенном для объемной обработки деталей [83], его вращающееся дно снабжено перегородками, расходящимися от центра к его периферии. Это позволяет рабочей среде сообщать дополнительное перемещение по дну емкости в радиальном направлении.



**Рис. 1.24. Устройство для центробежной абразивной обработки с перегородками.**

В этом случае линейная скорость заготовок равняется скорости вращения дна. Заготовки под действием центробежных сил поднимаются вверх к неподвижной образующей части барабана, теряют скорость и обратно падают в дно контейнера.

Несмотря на большую скорость, сообщаемую заготовками, относительная скорость скольжения абразива заготовки небольшая, а ударные нагрузки заготовок по неподвижной цилиндрической части большие. По этой причине использование данного устройства для обработки хрупких заготовок, например, самоцветные камни, приведет к поломкам заготовок и появлению трещины, что снижает качество обработки.

В другом устройстве для центробежно-абразивной обработки деталей [84], имеющем барабан с вращающимся дном и неподвижной верхней частью, введен дополнительный элемент в виде абразивного кольца, размещенного на границе между частями дна и верхней частью.

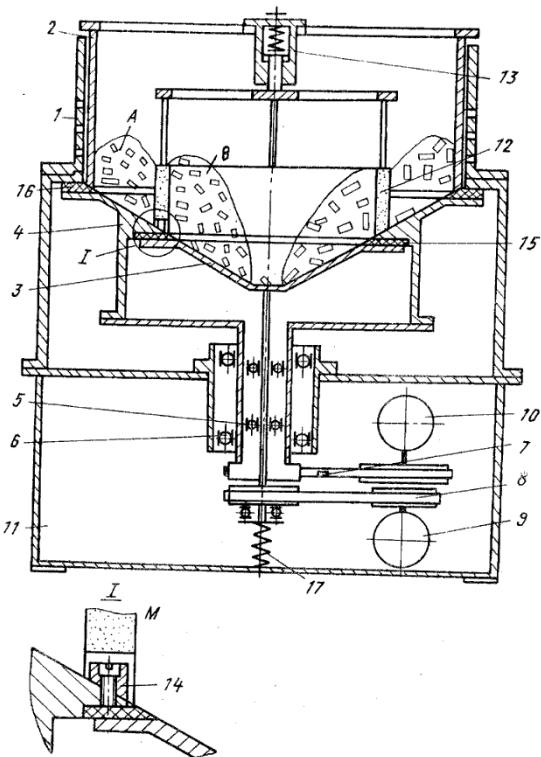


Рис.1.25. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей с вращающимся дном и неподвижной верхней частью

Дно и абразивное кольцо, размещенное на границе между дном и верхней цилиндрической частью, снабжены индивидуальными приводами. За счет разных скоростей вращения частей дна и абразивного кольца происходит дополнительный съем материала, что повышает производительность обработки. Недостатками данного устройства являются сложность изготовления специального инструмента в виде абразивного кольца, также неравномерный износ абразивного кольца, влияющего на производительность обработки и сложность изготовления станка вследствие наличия нескольких приводов.

### **1.2.1. Устройство для обработки шариков из самоцветных камней, предложенная конструкция.**

В предложенной конструкции устройства для центробежной абразивной обработки [66] поставлена цель - увеличение производительности и точности обработки и деталей, типа шаров из самоцветных камней, а также повышение долговечности рабочего инструмента путем обеспечения его равномерного

изнашивания. Это достигается тем, что в неподвижной верхней части монтированы пластины, перемещающие заготовки от центра к периферии и из периферии к центру, а стенки, образующие барабан, расположены перпендикулярно к его вращающему дну. На рисунке 1.16 показан принцип шлифовки шаровидных тел на данном устройстве. Устройство состоит из абразивного круга 1, приводного вала 2, пластины для перемещения заготовок к центру круга 3, пластины для перемещения заготовок к периферии круга 4, барабана 5, держателей барабана 7, державки 8, болтов 9.

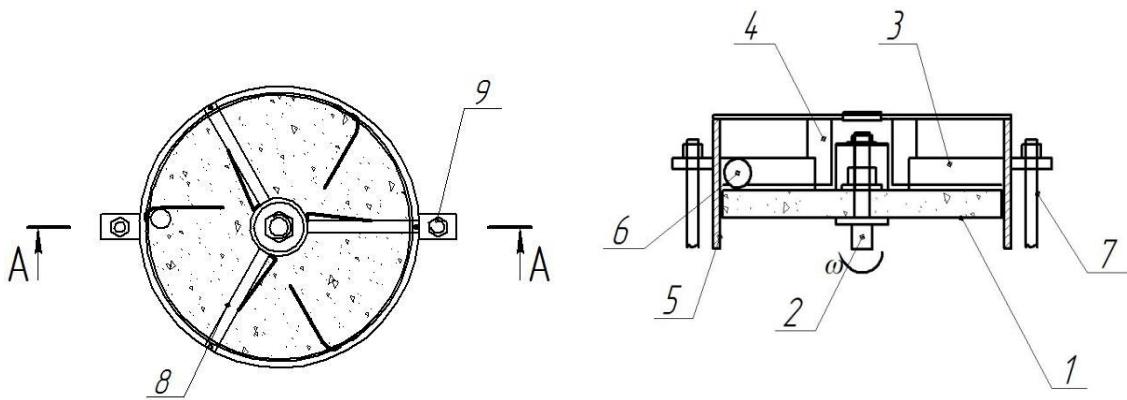


Рис. 1.16. Устройство для обработки шариков из поделочных камней

Дно, вращающее в виде опорного абразивного круга 1, приводится во вращательное движение приводным валом 2. Над абразивным кругом, с некоторым зазором установлены пластины 3 перемещающие заготовки к центру и 4 из центра в периферию. Пластины, перемещающие заготовки от периферии к центру, прикреплены непосредственно внутри барабана 5, а пластины, перемещающие заготовки от центра к периферии круга, монтированы в стержнях 8, прикрепленных к верхнему торцу барабана. Барабан 5 посредством ушек и стоек 7 и болтов 9 прикрепляется к станине станка.

Работа в данном устройстве осуществляется следующим образом: в начале заготовки размещают внутри барабана. В качестве заготовок служат предварительно обработанные галтованные шары 6. При вращении дна 1 представляющего собой абразивный круг, заготовки соприкасаются с неподвижными пластинами 3 и 4 и перемещаются под действием силы резания

вдоль пластины, также одновременно вращаются вокруг своих осей. Направление перемещения зависит от угла расположения пластины относительно радиуса круга в точке соприкосновения. Пластины расположены таким образом, что перемещают заготовки от периферии круга к центру (пластины прикреплены непосредственно внутри барабана 5) и от центра к периферии (пластины монтированы в стержнях 8, прикреплённых к верхнему торцу барабана).

После окончания обработки деталей 6 отключают вращение шпинделя 2 и выгружают детали. Данное устройство за счет трехосного вращения обеспечивает качественную обработку наружной поверхности деталей типа сферы.

Предложенное устройство для центробежной абразивной обработки позволяет повысить качество и производительность обработки заготовок из самоцветных камней, также существенно увеличить срок службы шлифовального круга за счет равномерного его изнашивания по всей рабочей поверхности.

#### **1.4. Цель и основные задачи исследования**

Целью данного исследования является повышение производительности и геометрической точности процесса изготовления шариков из самоцветных камней путём совершенствования оборудования и технологии производства.

Поставленная цель предполагает решение ряда практических и теоретических задач:

1. Исследование возможности повышения производительности и точности геометрической формы шариков из самоцветных камней за счет усовершенствования конструкции станков;
2. Установление технологических факторов, связанных с режимами обработки, на производительность и точность обработки;
3. Исследование условия обеспечения равномерного изнашивания инструмента;

4. Исследование влияния основных факторов на точность формы сферических поверхностей;
5. Многофакторное исследование процесса обработки и установление зависимости параметров процесса обработки от действующих факторов;
6. Разработка оборудования для осуществления предлагаемого способа обработки;
7. Определение экономической целесообразности использования данного способа обработки в промышленности.

Для решения поставленных задач используются следующие методы исследования:

1. Метод анализа, классификации и упорядочения исходной информации
2. Методы экспериментального исследования процессов формообразования шариков.
3. Статистические методы планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных.
4. Сравнительно-сопоставительный метод оценки результатов.

### **1.5. Заключение к главе 1**

1. Существующие способы обработки самоцветных камней в ювелирной промышленности малопроизводительны. Повышение производительности обработки позволяет значительно снизить себестоимость изделий и увеличить их выпуск.
3. Особенностью поделочных камней являются их хрупкость и высокая твердость, поэтому для их обработки требуется специальное оборудование и иной подход, чем при обработке изделий из металла.
4. Способы изготовления шариков из самоцветных камней машинным методом не в полной мере обеспечивают точность их геометрической формы, что влияет на качество изделий.
5. Более производительными являются способы центробежной абразивной обработки: -планетарно-центробежная обработка; центробежно-абразивная обработка деталей на установках с вращающимся дном и неподвижной верхней частью; центробежная абразивная обработка на установках, имеющих вращающееся дно с перегородками, эти способы обработки высокопроизводительны, но в большинстве случаев не пригодны для обработки

самоцветных камней по причине больших ударных нагрузок на обрабатываемые изделия.

6. Силы, действующие на заготовки при центробежно-абразивной обработке, можно регулировать изменением частоты вращения емкостей или дна емкостей.

7. Точность центробежной абразивной обработки шариков не зависит от разброса диаметрального размера одновременно обрабатываемых деталей, что позволяет одновременно обработать изделия разных размеров.

8. Варьируя усилия прижима деталей, скорости относительного скольжения, зернистости абразива, можно создавать различные условия протекания процесса обработки.

9. Предлагаемое центробежное устройство с направляющими пластинами обеспечивает трехосное вращение шаровидных заготовок при их обработке, что создает условия для исправления их геометрической формы.

## **ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ШАРИКОВ ИЗ САМОЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ**

Процесс формообразования шаровидных изделий выполняются в два этапа. Первое, это округление или срезание вершин кубиков, и второе, формообразование до шаровидной формы.

Процесс округления вершин кубиков осуществляется галтовкой. Из множества способов галтовки чаще всего используется галтовка в барабанах с горизонтальной осью вращения.

### **2.1. Процесс исследования галтовки кубиков из самоцветных камней.**

#### **2.1.1. Применение галтовки с горизонтальной или наклонной осью в барабанах.**

Процесс изготовления изделий шаровидной формы из самоцветных камней осуществляется в следующей последовательности:

1. Операция резания кубиков из исходного сырья, который включает ряд операций: разрезание исходного материала на пластины; резание брусков из пластины; резание кубиков из брусков.
2. Галтовка кубиков с целью сглаживания острых граней и вершин.
3. Формообразование шаров шлифованием.
4. Полировка шаров.

Процессы резания достаточно производительны, но галтовка кубиков и формообразование шаров имеют низкую производительность. Задача галтовки при обработке самоцветных камней заключается в округлении граней и углов. В настоящее время галтовки кубиков в основном применяют галтовочные барабаны, имеющие горизонтальную ось вращения. Более подробно рассмотрим процесс галтовки кубических заготовок из самоцветных камней.

В зависимости от частоты вращения барабана характер движения заготовок внутри барабана различен (рис. 2.1). На рисунке 2.1а показано движение заготовок при малых частотах вращения заготовок. Как видно, при малых

частотах вращения барабана интенсивность смещивания заготовок невысокая (рис.2.1а). При больших частотах вращения из-за возрастания центробежных сил инерции происходит прижатие заготовок к стенке барабана, и обработка практически прекращается (рис.2.1б). Для повышения производительности обработки необходимо определить максимально допустимую частоту вращения барабана, обеспечивающую наибольшую производительность.

Производительность обработки и качество обработанной поверхности зависят от характера взаимодействия абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью, производительности обработки и качества обработанной поверхности. При линейных скоростях 0,5-1м/с, которые обычно сообщаются галтовочным барабанам, не обеспечивается величина контактного давления, необходимая для срезания стружки.

Поэтому съем материала с поверхности заготовки незначителен, а продолжительность обработки составляет 4-48 часов. Установлено, что в жидкой среде производительность обработки выше, качество обработанной поверхности лучше, чем при сухой обработке. Поэтому барабанную галтовку осуществляют в жидкой среде с использованием раствора кальцинированной соды, технического мыла, активных смачивателей типа ОП-10, тринатрийфосфата и др.

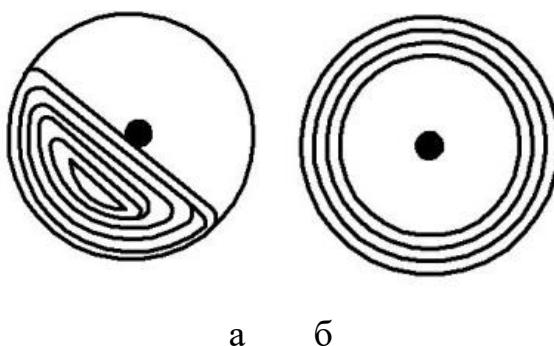


Рисунок 2.1. Влияние частоты вращения барабана на характер движения заготовок

а — работа станка при малых частотах вращения барабана; б — работа при больших частотах вращениях барабана

Силы, действующие на заготовку во вращающемся барабане радиусом  $R_6$ , показаны на рисунке 2.2. К этим силам относятся: сила тяжести- $G$ , сила трения заготовок по стенкам барабана стенки барабана -  $T$ , центробежная сила –  $F^n$ . Характер действия этих сил в разных точках разный. В точке  $A_0$  сила тяжести и центробежная сила имеют одинаковое направление, а в точке  $A_2$  они перпендикулярны. При нахождении заготовки в точке  $A_1$  сила тяжести составляет угол  $\alpha$  с направлением центробежной силы и  $90^\circ - \alpha$  с направлением силы трения. Чтобы заготовка преодолела точку  $A_2$ , необходимо, чтобы сила трения- $T$  заготовки в данной точке была больше силы тяжести  $G$ . Минимальная частота вращения для удержания заготовок в верхней точке  $A_3$ , при  $\alpha = 180^\circ$ , должна быть такова, чтобы центробежная сила уравновешивала силу тяжести.

Величины этих сил следующие:

$$\text{сила тяжести } G = mg ; \quad (2.1)$$

$$\text{центробежная сила } F^n = m \omega^2 R \quad (2.2)$$

Величину нормальной и тангенциальной составляющих силы тяжести можно определить по формулам:

$$N = G \cos \alpha = mg \cos \alpha \quad (2.3),$$

$$S = G \sin \alpha = mg \sin \alpha \quad (2.4)$$

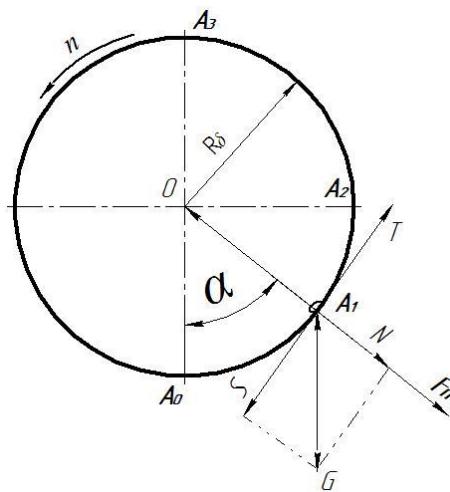


Рисунок 2.2. Схема действия сил на заготовки при обработке

Величина сила трения заготовки с внутренней поверхностью барабана зависит от центробежной силы  $F^n$  и радиальной составляющей силы тяжести -  $N$ . Его значение можно определить как:

$$T = (F^n + N)f \quad (2.5)$$

где  $f$  - коэффициент трения между обрабатываемой заготовкой и стенкой барабана.

Значение  $F^n$  и  $N$ , подставляя формулу (2.5), получим:

$$T = (m \omega^2 R + mg \cos\alpha) f \quad (2.6)$$

Характер движения заготовки зависит от величины и соотношения силы трения и касательной составляющей силы тяжести -  $T/S$ . При условии, когда величина  $T/S > 1$ , заготовка прилипает к стенке барабана и вращается вместе с ним (рис. 2.1б). В случае  $T/S < 1$  заготовки скользят вниз. Если  $T/S = 1$ , или  $T = S$  получим:

$$(m \omega^2 R + mg \cos\alpha) f = mg \sin\alpha \quad (2.7)$$

Вместо угловой скорости- $\omega$ , подставляя частоты вращения барабана- $n$  (об/мин),  $\omega = \pi n / 30$ , получим:

$$n = (30/\pi) \sqrt{(\sin\alpha - \cos\alpha f) g / R_\sigma f} \quad (2.8)$$

При значениях  $n > (30/\pi) \sqrt{(\sin\alpha - \cos\alpha f) g / R_\sigma f}$  заготовка прилипает к стенке и перемещается вместе с ней.

Например, для положения  $A_2$ :  $\alpha = 90^\circ$  ( $\sin\alpha = 1$  и  $\cos\alpha = 0$ ),

$$n_{A2} > (30/\pi) \sqrt{g / R_\sigma f} \quad (2.9)$$

Эксперименты показали, что оптимальные скорости барабана, обеспечивающие наибольшую подвижность заготовок, также зависят от объема загрузочной массы, заполняющей барабан. Производительность обработки зависит от объема загрузки, соотношения жидкой и твердой фазы загрузочной массы, частоты вращения барабана. Исследования процесса галтовки показали, что зависимость интенсивности съема от объема загрузки имеет экстремальный характер [28].

На рисунке 2.3. показано влияние жидкой составляющей загрузочной массы на производительность барабанной галтовки. По оси ординат показана производительность-  $Q = (\Delta m / m_0) \times 100\%$ . По оси абсцисс соотношение жидкой и твердой фазы в процентах.

Из графика видно, что в водной среде при наличии абразива производительность выше. Исследование соотношения жидкой и твердой фазы загрузки показало, что производительность, когда максимальное количество жидкости, составляет 75% от объема загрузочной массы [55,56,57,58].

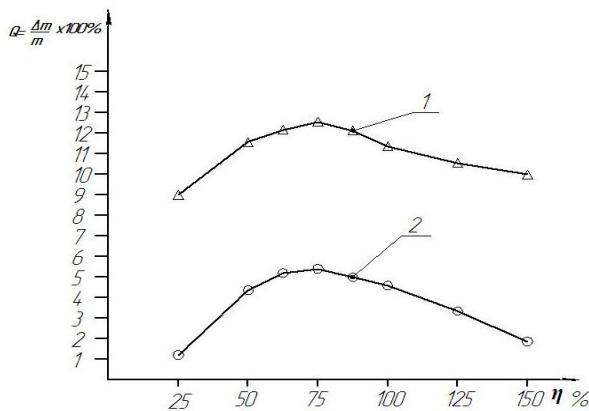


Рисунок 2.3. Влияние жидкой составляющей загрузочной массы на производительность барабанной галтовки.

1. Обработка в абрзивной среде (количество абрзива 5г на 1кг массы заготовок)
2. При галтовке в жидкости без добавления абрзива.

## 2.1.2. Планетарно-центробежная галтовка кубиков из самоцветных камней

Планетарно-центробежная обработка - наиболее производительный способ обработки. Рассмотрим возможности использования данного способа при обработке изделий из самоцветных камней.

При планетарно-центробежной галтовке съем материала производится за счет воздействия центробежных сил инерции, значение которых многократно превышает значение силы тяжести.

На рисунке 2.4 приведены инерционные силы, действующие на заготовку при обработке. Эти силы следующие:  $F_e^{\omega_b}$  – переносная центробежная сила;  $F_r^{\omega_k}$  – относительная центробежная сила;  $F_k$  – Кориолисова сила инерции.

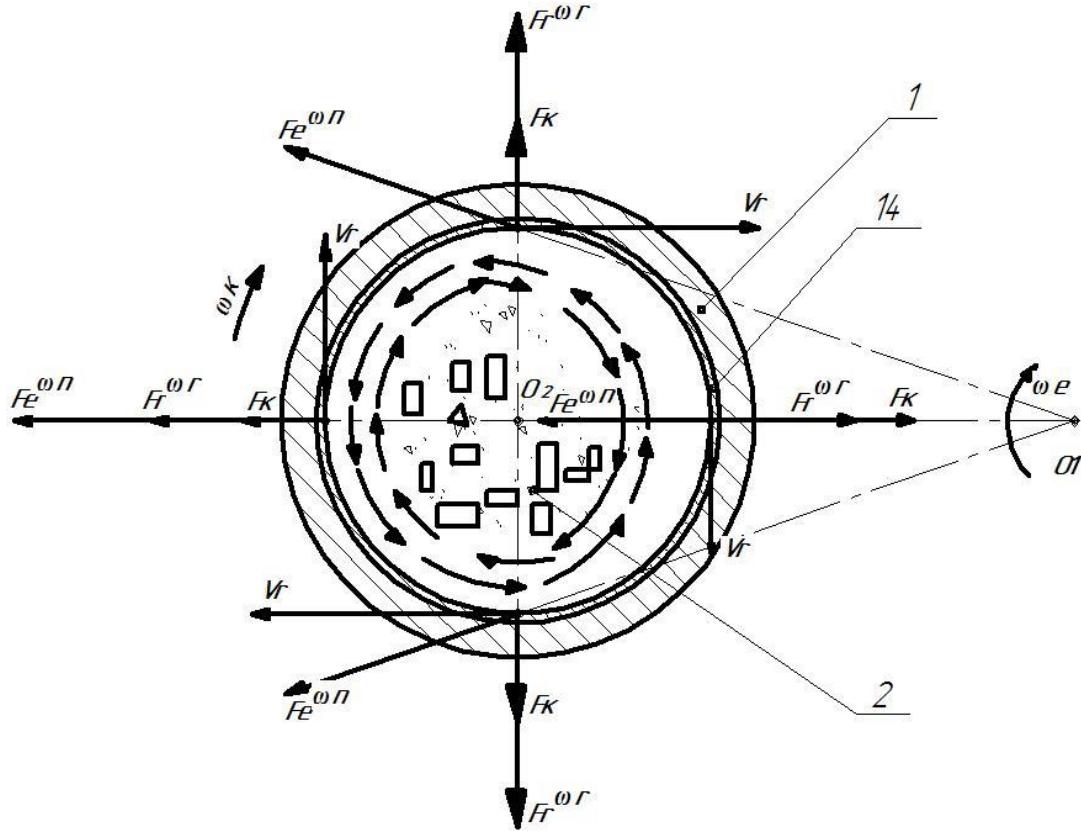


Рисунок 2.4. Силы, действующие при обработке на планетарно-центробежном станке

При обработке на планетарно-центробежном станке режимы обработки: вращение вокруг центральной оси- $O_1$  и оси барабана- $O_2$  определяют соотношение сил, действующих в процессе обработки, и сильно влияют на качество и производительность процесса. Наилучшие результаты достигаются тогда, когда соблюдаются условия  $F_e^{\omega_b}$  больше значения  $F_r^{\omega_k} + F_k$ . В этом случае загрузочная масса прижимается в определенной части контейнера и активно смешивается под влиянием силы трения с внутренней частью вращающегося контейнера.

Если значение  $F_r^{\omega_k}$  больше  $F_e^{\omega_b}$ , в этом случае загрузочная масса прилипает к стенкам контейнера и производительность обработки резко снижается.

Для определения основных факторов, действующих на процесс обработки, были проведены экспериментальные исследования процесса обработки [34, 35]. Общий вид станка показан на рисунке 2.5.

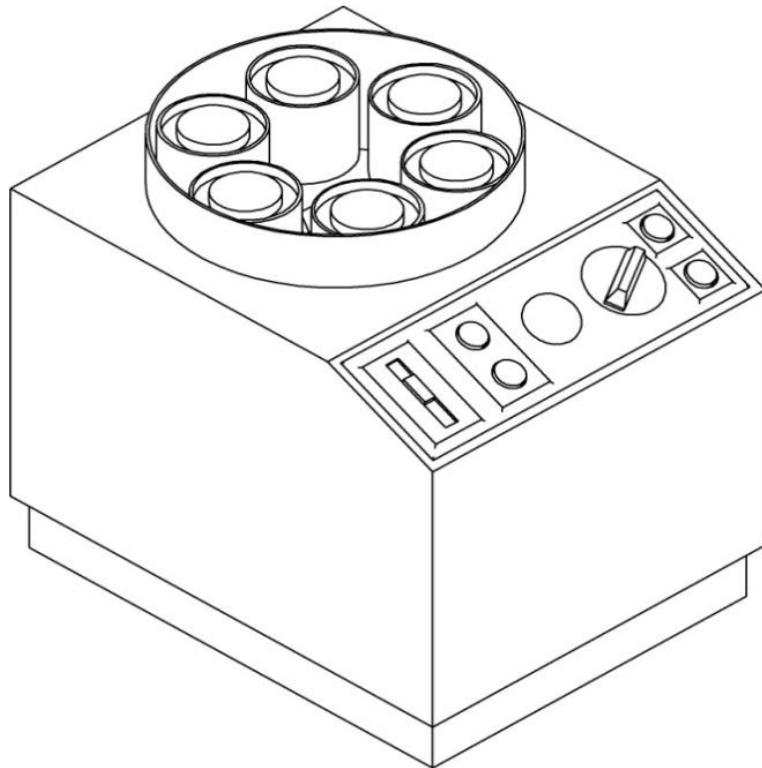


Рисунок 2.5. Обработка самоцветных камней  
на центробежно-планетарном станке.

Станок работает следующим образом (рисунок 2). Обрабатываемые детали 2 и абразивную массу загружают в рабочий контейнер 1 станка. Контейнер 1 съемный. После загрузки контейнер вставляют в стакан 3 станка. Стакану 3 сообщается одновременное вращение вокруг осей  $O_1O_1^1$  и  $O_2O_2^1$ . Стакан 3 жестко посажен на оси 5. Ось 5 посредством подшипников и корпуса установлена в планшайбе 4. Шестерня 6 установленная на нижней части оси 5, служит для передачи вращательного движения контейнеру 1 с заготовками. Данная шестерня входит в зацепление с зубчатым колесом 7, закрепленным в корпусе 13. Планшайба 4 посажена на центральный вал 8. Валу 8 сообщается вращательное движение посредством шкива 9 и ременной передачи. Частоты вращения планшайбы и контейнеров можно менять посредством зубчатого колеса 7 и шестерни 6. Для обеспечения циркуляции заготовок в вертикальной

плоскости дно контейнера изготовлено в виде усеченного конуса. Специальная втулка с абразивным покрытием 14, вставляемая в цилиндрической части барабана, способствует повышению съема материала и соответственно производительности обработки.

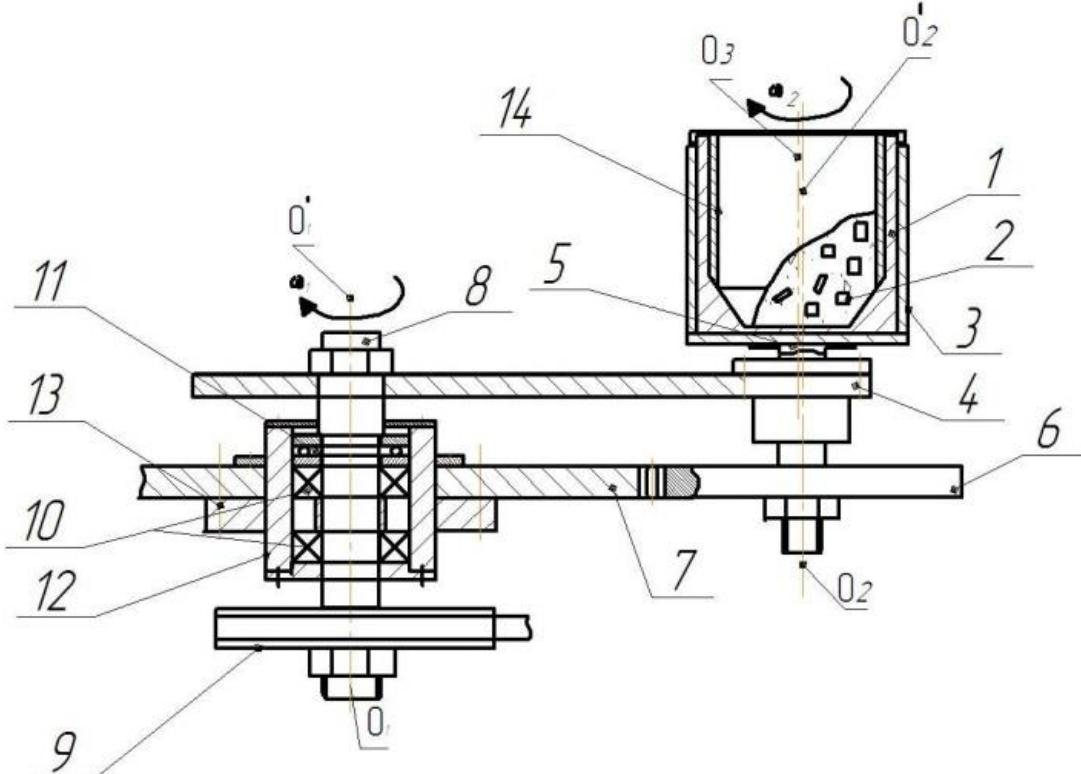


Рисунок 2.6. Эскиз рабочей части центробежно-планетарного станка

Объем емкостей и их количество выбираются исходя из потребности конкретного производства. Уменьшая количество емкостей можно увеличить их объем, что соответствует условиям крупносерийного производства или, наоборот, увеличивая количество емкостей, уменьшить их объем, что соответствует условиям мелкосерийного производства. Таким образом, один и тот же станок можно эффективно использовать при любом типе производства. Использованная при экспериментах установка имеет 5 емкостей, что позволяет одновременно в отдельных емкостях обработать рваные камни с различными физико-химическими характеристиками.

На производительность и качество обработки наиболее сильно влияют: частота вращения планшайбы, соотношение объема барабана к объему загрузки,

соотношение абразивных материалов и неабразивная составляющая загрузочной массы, соотношение загрузочной массы и массы жидкости, количество абразивных материалов и их свойства, зернистость используемого абразива.

При данном способе для обработки кубиков из самоцветных камней установлено, что интенсивность съема при обработке высокая. В среднем величина съема при данном способе составляет 5,18 гр в течение минуты с одного килограмма обрабатываемого материала. Для сравнения этот показатель при обработке на галтовочном барабане с горизонтальной осью вращения ниже в 5 раз. При этом производится объемная обработка. Придание заготовкам правильной формы, например, шаровидной формы при этом невозможно. Способ планетарно-центробежной обработки при изготовлении шариков из самоцветных камней можно использовать для предварительной обработки, в том числе снятия острых граней и углов, снижения шероховатости поверхностей.

Результаты опытов показали, что на заготовительных операциях производительность процесса центробежно-планетарной обработки в 4-6 раз выше производительности обработки на галтовочном барабане. Данный процесс можно использовать как заготовительный этап обработки при формообразовании из кубических заготовок шариков.

### **2.1.3. Исследование формообразования шариков при обработке на двухдисковом станке 1**

Один из наиболее распространенных способов формообразования шаровидных поверхностей диаметром до 20мм — это их обработка в двухдисковых станках между двумя дисками, вращающимся нижним и прижимным верхним. (рис. 2.7).

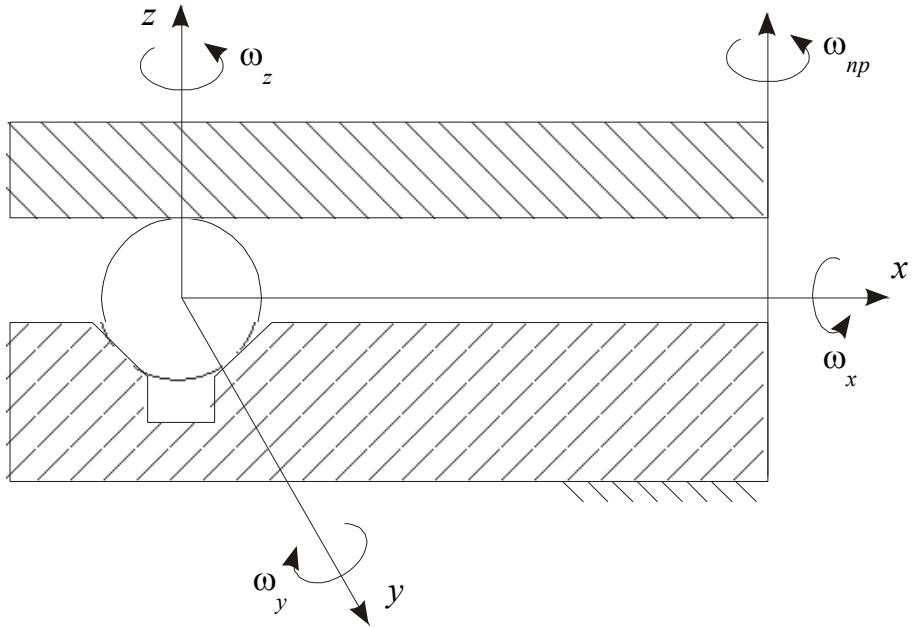


Рисунок 2.7. Обработка шариков на двухдисковом станке

Абразивная обработка является основным способом формирования шариков из самоцветных камней. Наиболее распространённым методом окончательного формирования профиля шариков является их обработка в двухдисковом станке, где нижний диск вращающийся, а верхний прижимной диск неподвижный. Шаровидные заготовки при этом размещаются в кольцевых канавках нижнего диска. При данном методе обработки вращение шарика происходит вокруг осей ОХ и ОZ. Поворот вокруг оси ОУ ограничен. Этому препятствует сила трения контакта с дисками. При этом углы поворота шариков вокруг осей координат примерно составляют  $360^0$ ,  $8^0$ ,  $1^0$ . [59,60,61,62,63].

Данный метод обработки не обеспечивает изменения этого соотношения. На рисунке 2.8 показана схема распределения скоростей проскальзывания в зонах инструмента с шариком при обработке.

Как видно из эпюра, распределение скоростей проскальзывания распределяется на три зоны. Скорость относительного скольжения в левой и правой зоне имеют одно направление, а в средней зоне скорость направлена противоположно крайним зонам [64].

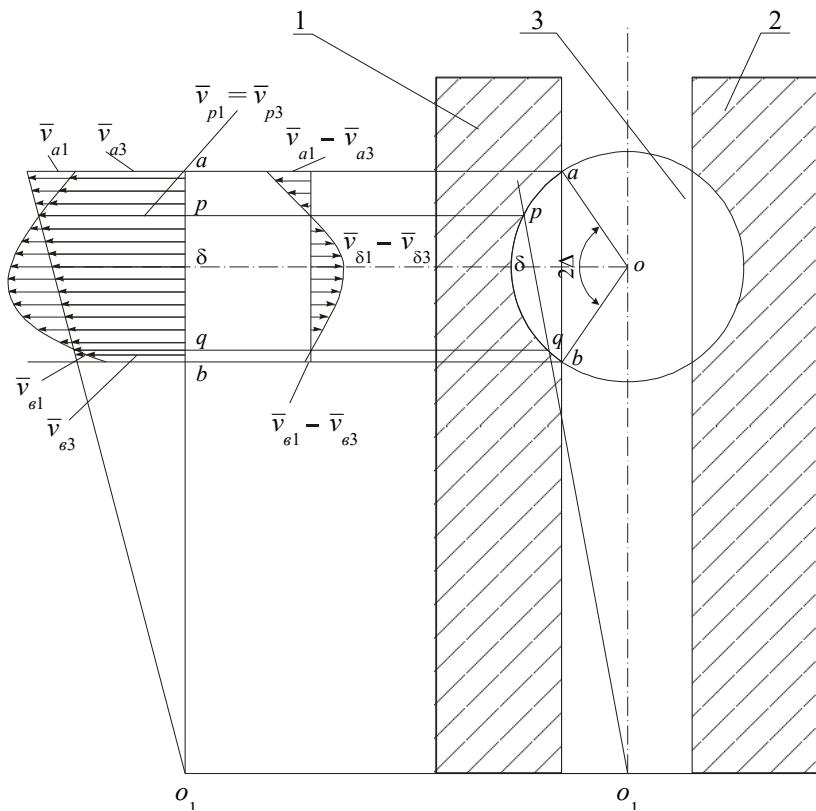


Рисунок 2.8. Распределение скоростей проскальзывания в нормальной плоскости

По причине неодинаковой скорости вращение вокруг координатных осей, точность формообразования также низкая. Производительность обработки вследствие низких скоростей и малого съема также низкая. При этом не обеспечивается стабильность формообразования и наблюдается большое отклонение формы от сферичности. Данная схема обработки не обеспечивает равномерного трехосного вращения и соответственно высокую точность формы. Для повышения точности обработки следует применять новые схемы, обеспечивающие равномерное вращение вокруг координатных осей.

#### 2.1.4. Отрезки между труб для профилирования шаров

На рисунке 2.9 показано профилирование шара между отрезками труб. Это наиболее распространенный способ образования сферических поверхностей из самоцветных камней [65,66]. При данном способе обработки шарообразную заготовку устанавливают между двумя отрезками труб, расположенных под углом друг к другу. При обработке верхняя труба удерживается рукой, а нижняя получает вращательное движение с частотой 150 - 500 об/мин.

Верхней трубе вручную сообщают вращательное движение по поверхности заготовки, при этом снимаются все выступающие места. В зонах контакта труб с заготовкой подается абразив. На качество обработки влияет исходное состояние шаровидной заготовки. Когда заготовка не имеет острых углов и граней она свободнее вращается между трубами и быстрее приобретает правильную геометрическую форму. Поэтому необходимо на заготовительных операциях проводить тщательную обработку. Инструменты в виде трубы, применяемые для формообразования шаровидной заготовки в изделиях формы шара, изготавливают специально. Для обеспечения большой площади контакта рабочей поверхности инструмента его внутренние края срезают под углом  $45^{\circ}$ . Диаметр инструмента должен составлять  $0,6 - 0,8$  от диаметра обрабатываемой заготовки.

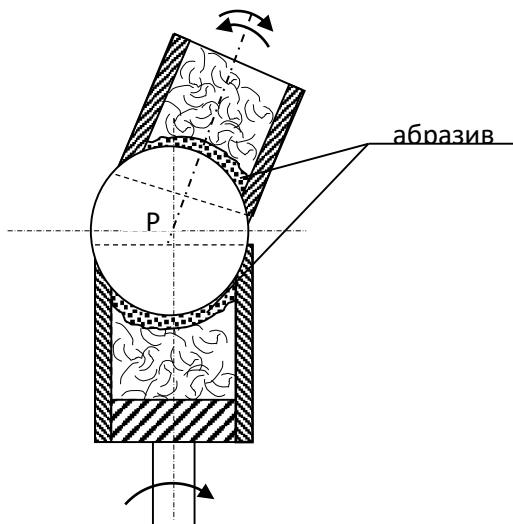


Рисунок 2.9. Профилирование шара между отрезками труб

Применением данного способа можно обработать шары с диаметрами в пределах 50-300мм. К недостаткам данного способа можно отнести следующие: зависимость качества обработки от квалификации исполнителя; низкая производительность процесса обработки. Зависимость качества обработки от квалификации исполнителя.

Эксперименты показали, что когда отклонение от сферичности в пределах до 1мм для диаметров 20-50мм и до 2мм для диаметров 50-80мм, исправление формы этим способом не занимает много времени и достигается более высокая

точность формы (в пределах до 0,1мм). Поэтому применение данного метода для окончательного формообразования является целесообразным.

### **2.1.5. Формообразование шаров на центробежных станках**

При центробежной абразивной обработке на станках с вращающимся дном снятие припуска происходит за счет взаимодействия абразивных частиц с заготовками. Для снятия припуска можно использовать свободный или закрепленный абразив. При использовании свободного абразива происходит объемная обработка, при которой управлять формой обрабатываемых поверхностей не представляется возможным. Даный способ можно применять при операции снижения шероховатости, снятии заусенцев, притуплении острых граней и т.д. Придание определенной заранее установленной формы заготовкам, например, формы шара при данном способе невозможно. Производительность данного способа выше, чем при галтовке в барабане с горизонтальной осью вращения. При центробежной абразивной обработке на станке с вращающимся дном, где в качестве дна служит абразивный или алмазный инструмент, придание заготовкам сферической формы осуществимо. Проведенные сравнительные исследования по обработке самоцветных камней на центробежном станке свободным и закрепленным абразивом показали, что при использовании абразивного инструмента производительность выше и качество обработанных изделий лучше, чем при обработке свободным абразивом [70,71,72,73,74,75,76].

Из анализа производительности различных способов галтовки (рис.1.12) следует, что наиболее производительной является планетарно-центробежная обработка. Производительность данного процесса составляет 5,18г/кгмин. Однако использовать его для формообразования, например, образования шариков из самоцветных камней не представляется возможным. Использование центробежных станков с вращающимся дном из абразивного инструмента позволяет формообразовать шаровидные заготовки. Обработка при этом

происходит за счет резания связанными абразивными зернами стружек с поверхности заготовки. Активное смещивание заготовок центробежными силами позволяет постепенно обработать все заготовки. Заготовки при этом многократно проходят через зону обработки [77,78].

В другом способе [76, 79] заготовки, имеющие форму кубика с гладкими вершинами и острыми углами, размещаются в пазах сепаратора в отдельности в каждом пазе по одной заготовке. Сепаратор размещен внутри инструмента, имеющего форму барабана, на внутренней поверхности которого нанесен абразивный слой определенной зернистости. При обработке сепаратору с деталями сообщают вращательное движение с установленной частотой. Под действием центробежных сил происходит прижим заготовок к рабочей поверхности инструмента. Силу прижима в этом случае определяется частотой можно вращения сепаратора. Его можно регулировать бесступенчато и в больших пределах за счет изменения частоты вращения сепаратора. Инструмент при этом совершает возвратно-поступательные движения с определенной амплитудой и частотой.

Недостатком данного способа обработки является сложность изготовления инструмента и его быстрый износ при работе.

Известен другой метод обработки в контейнерах с вращающимся дном [80,81,82]. Этот метод широко используется для выполнения таких операций, как удаление заусенцев и округление острых кромок. Обработка при этом производится за счет относительного скольжения заготовок и абразивной массы. Чем больше скорость смещивания абразива с заготовкой, тем больше величина съема и соответственно производительность обработки.

Имеется устройство для центробежной абразивной обработки заготовок [82]

В котором при вращении дна под действием центробежных сил заготовки и абразивная масса, перемещаясь по криволинейному профилю дна, совершает сложное движение. Заготовки, взаимодействуя с вертикальными пластинами криволинейного профиля, установленными в неподвижной крышке, замедляют

ход и обратно падают в контейнер. За счет относительного движения и смешивания заготовок и абразивной массы происходит объемная обработка заготовок. Производительность данного способа обработки низкая, также практически невозможно управлять формой обрабатываемых заготовок. Данный способ в основном используется при выполнении операции по удалению заусенцев и округления острых граней заготовок.

Также известна установка для центробежной объемной обработки деталей. В данном устройстве [83] дно снабжено перегородками, выполненными в виде ломаных поверхностей, расходящихся от центра к его периферии. Заготовкам в этом случае сообщается перемещение по дну рабочей емкости в радиальном направлении. Они получают линейную скорость равной скорости вращения дна и под действием центробежных сил перемещаются вверх к неподвижной образующей части барабана, накапливаются и обратно падают на дно рабочей емкости.

При обработке заготовки испытывают большие ударные нагрузки. Использование данного устройства для обработки хрупких заготовок, какими являются самоцветные камни, приведет к появлению трещин, что снижает качество обработки.

Другое устройство для центробежной абразивной обработки заготовок [84] имеет вращающееся дно и неподвижную верхнюю часть. Данное устройство снабжено абразивным кольцом, находящимся на границе между частями дна, на его верхней части. Эти части снабжены индивидуальными приводами. За счет разных скоростей вращения частей дна повышается интенсивность обработки, так как наличие абразивного кольца между частями дна приводит к дополнительному съему материала и соответственно повышению производительности обработки.

Недостатками данного устройства являются неравномерный износ абразивного кольца и быстрая потеря работоспособности, также сложность изготовления станка из-за наличия нескольких приводов.

Линейная скорость вращения круга при обработке на центробежном станке с вращающимся дном составляет 15 м/сек и более. Заготовки, размещенные в емкости с вращающимся дном, получают вращательное движение от абразивного круга (рис.2.10) и под воздействием центробежных сил, перемещаясь к периферии, прижимаются к неподвижной стенке барабана. Эксперименты показали, что для активного смещивания количество заготовок должно составлять не менее половины объема емкости. Съем материала заготовки производится абразивными зернами инструмента удерживаемыми связками. Поэтому данный способ обработки относится к обработке связанным абразивом. Скорость резания определяется линейной скоростью абразивного круга. Чем больше скорость абразивного круга, служащего в качестве режущего инструмента, тем интенсивнее происходит обработка. Когда заготовок много и они заполняют не менее половины объема емкости, заготовки, расположенные выше, удерживают нижние слои, тем самым увеличивают скорость относительного скольжения абразив-заготовка и создают условия для интенсивной обработки. Загрузочная масса при этом получает сложное торOIDальное движение, заключающееся в одновременном вращении в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

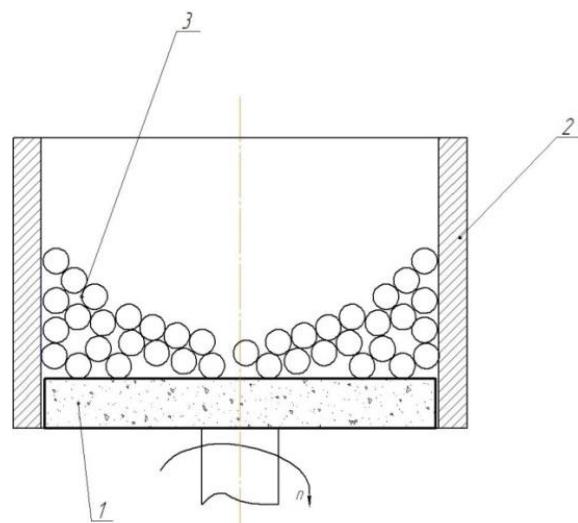


Рисунок 2.10. Центробежная обработка шариков на станке с вращающимся дном

1- Вращающееся дно, состоящее из абразивного инструмента 2- Емкость для заготовок, 3-Заготовки из самоцветных камней.

Обработка на центробежном станке с вращающимся дном, состоящем из абразивного инструмента, показала, что при обработке шаровидных изделий их формы исправляются и отклонение от округлости снижается. Обработка шаров диаметром 35-70 мм при центробежной обработке на станке с вращающимся дном показала, что в начале обработки происходит интенсивный съем, и исправление формы заготовок высокое. По достижении определенного значения исправление практически формы прекращается, и происходит равномерная обработка по всей поверхности заготовок. Например, обработка заготовок, имеющих шаровидную форму со средним диаметром 40, изготовлены из офиокальцита, отклонение от сферичности которых в среднем составляло 3,8 мм, после 120мин обработки отклонение от сферичности составляло 0,6мм. После 240мин обработки отклонение от сферичности составлял 0,55. Таким образом, в течение 120 мин дальнейшей обработки исправление формы практически прекращается [85, 86].

На графике 2.12 показаны зависимости исправления формы шарообразных заготовок из лазурита при различных углах наклона стенки рабочей емкости. Эксперименты показали, что наибольшая производительность, а также исправление формы имеет место при условии  $\alpha = 0^\circ$ .

Исправление погрешности определяется в процентах как отношение величины исправления после обработки к исходной погрешности.

Из рисунка 2.12 видно, что исправление формы заготовок (приобретение им сферичности) наиболее интенсивно происходит, когда стенки рабочего контейнера перпендикулярны рабочей поверхности инструмента. Исходя из этого можно заключить, что при обработке шариков наиболее рациональным являются условия, когда стенки расположены перпендикулярно относительно рабочей поверхности инструмента.

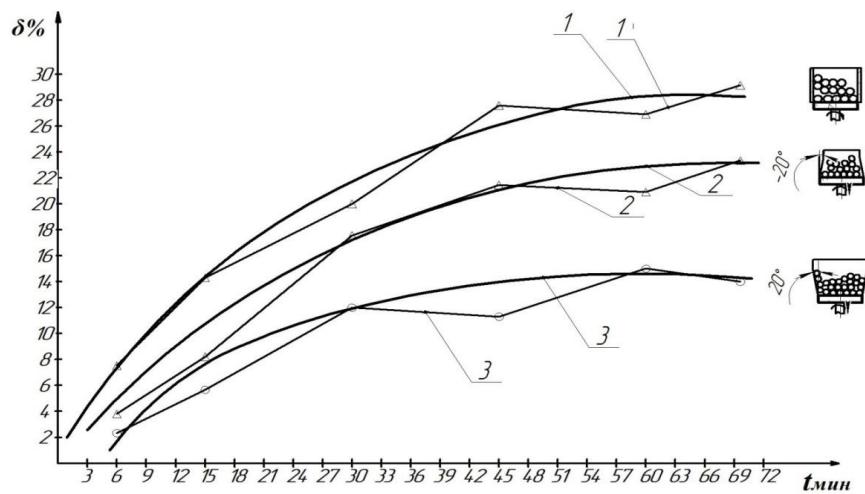


Рисунок 2.12. Исправления формы шарообразных заготовок из лазурита при различных зависимостях исследований углов наклона стенки рабочей емкости  
1.  $\alpha = 0^\circ$ . 2.  $\alpha = -20^\circ$ . 3.  $\alpha = 20^\circ$ .

Эксперименты показали, что при значении  $\alpha = 0^\circ$  производительность максимальная. При изменении угла  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $20^\circ$ , также  $0^\circ$  до  $-20^\circ$  производительность обработки и исправление формы снижаются (рис. 2.13). Исходя из этого можно считать, что значение  $\alpha=0^\circ$  является оптимальным вариантом.

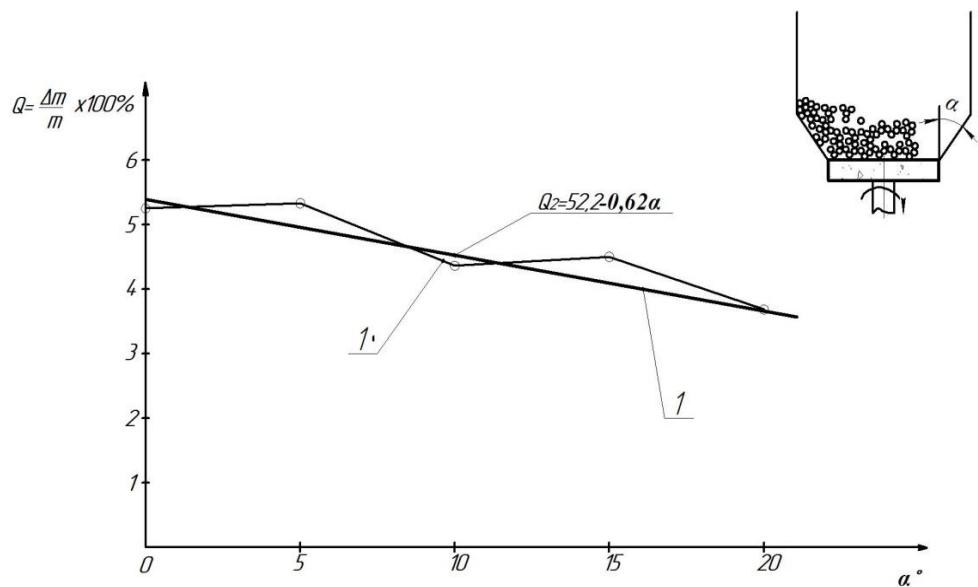


Рисунок 2.13. График зависимости производительности от угла наклона стенки барабана.

1<sup>1</sup>. Экспериментальные данные

1. Зависимость  $Q \rightarrow f(\alpha)$ , полученная математической обработкой данных

Вопрос использования преимущества способа центробежной абразивной обработки при изготовлении изделий из самоцветных камней рассмотрен в ряде работ. Например, в работе [70] предложена конструкция устройства для обработки самоцветных камней, в которой используется способ центробежной абразивной обработки, обеспечивающий высокую производительность, при этом также обеспечивается некоторое улучшение геометрической формы заготовок при обработке шариков. Для использования данного устройства необходимо иметь предварительно обработанные шарики с отклонением от правильной сферической формы в пределах не более 2мм на диаметре до 20 мм. Такие заготовки получаются из кубиков обработкой на галтовочном барабане или планетарно-центробежной обработкой.

## **2.2. Центробежно-абразивная обработка самоцветных камней на станке с направляющими пластинами**

### **2.2.1. Устройство новой конструкции для обработки шариков из самоцветных камней.**

В предложенной конструкции с целью повышения производительности и точности обработки и деталей типа шаров, повышения долговечности абразивного инструмента путем обеспечения его равномерного изнашивания инструмента. В качестве вращающегося дна используется абразивный круг, или алмазная планшайба. Для обеспечения равномерного изнашивания инструмента в неподвижной верхней части монтированы пластины, перемещающие заготовки от центра к периферии и из периферии к центру. На рисунке 2.15 показан принцип шлифовки шаровидных тел на данном устройстве. Устройство состоит (рис. 2.15) из абразивного круга 1, приводного вала 2, пластины для перемещения заготовок к центру круга 3, пластины для перемещения заготовок к периферии круга 4, барабана 5, держателей барабана 7, державки 8, болтов 9.

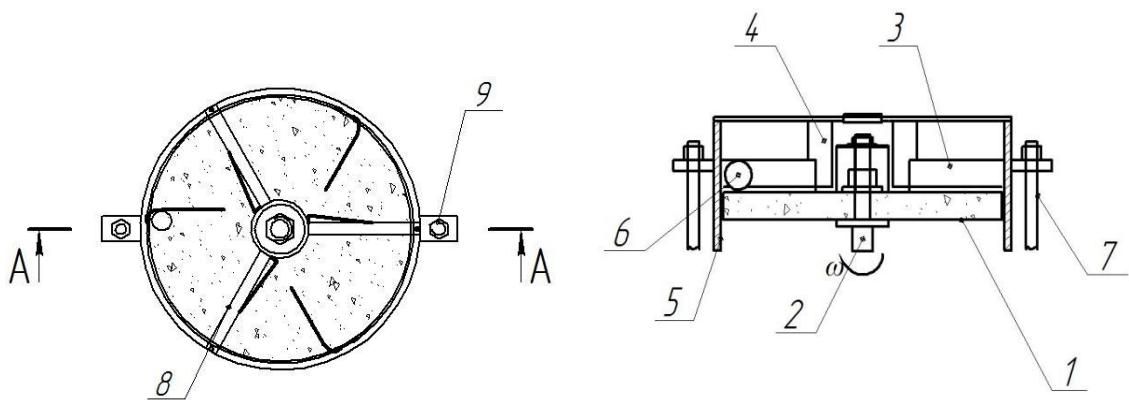


Рисунок 2.15. Устройство для обработки шариков из поделочных камней

В качестве вращающегося дна используется абразивный круг 1, который приводится во вращательное движение приводным валом 2. Над абразивным кругом с некоторым зазором установлены пластины 3, перемещающие заготовки к центру и 4 из центра к периферии. Пластины, перемещающие заготовки от периферии к центру, прикреплены непосредственно внутри барабана 5, а пластины, перемещающие заготовки от центра к периферии круга.



Рисунок 2.16. Станок для формообразования шариков из самоцветных камней монтированы в стержнях 8 , прикреплённых к верхнему торцу барабана. Барабан 5 посредством ушек и стоек 7 и болтов 9 прикрепляется к станине станка.



Рисунок 2.17. Износ круга в процессе обработки

Работа в данном устройстве осуществляется следующим образом: вначале заготовки размещают внутри барабана. В качестве заготовок служат предварительно обработанные галтованные шары 6. При вращении дна 1, представляющего собой абразивный круг, заготовки приводятся в движение. Когда заготовки соприкасаются с неподвижными пластинами 3 и 4, под действием силы резания они вращаются вокруг своих осей и одновременно перемещаются вдоль пластины. Направление перемещения зависит от угла расположения пластины относительно радиуса круга в точке соприкосновения. Пластины расположены таким образом, что перемещают заготовки от периферии круга к центру (пластины прикреплены непосредственно внутри барабана 5) и от центра к периферии (пластины, монтированные в стержнях 8, прикрепленных к верхнему торцу барабана).

После окончания обработки деталей 6 отключают вращение шпинделя 2 и выгружают детали. Данное устройство за счет трехосного вращения обеспечивает качественную обработку наружной поверхности деталей типа шаров.

Использование данного устройства улучшает качество обработки и существенно повышает производительность процесса обработки заготовок из самоцветных камней, при этом также повышается срок службы шлифовального круга за счет равномерного его изнашивания по всей рабочей поверхности.

При отсутствии направляющих пластин траектория движения шариков определяется внутренней поверхностью барабана. В данном случае внутренняя

поверхность барабана составляет окружность. Заготовки, перемещаясь по окружности, соприкасаются с ограниченным участком абразивного круга. В этом случае абразивный круг изнашивается неравномерно. На рисунке 2.17 показан износ абразивного круга, происходящий при таком способе обработки. Чтобы равномерно изнашивался абразивный круг, необходимо, чтобы работа силы трения во всех точках соприкосновения с заготовками была одинаковой.

Работу силы трения можно определить как  $A_{тр} = F_{тр} S_L$ , (2.10)

где  $F_{тр}$  -сила трения заготовки при перемещении по инструменту,  $S_L$ - путь трения. Путь трения зависит от расстояния месторасположения заготовки до оси вращения круга положения заготовки в абразивном кругу. При частоте вращения круга равной  $w_{kp}$   $S_L = w_{kp} R_i t_i k$  (2)

где  $w_{kp}$  – частота вращения круга,  $R_i$  -расстояние от месторасположения заготовки до оси вращения круга,  $t$ -продолжительность нахождения заготовки в контакте при радиусе  $R_i$   $k$  – коэффициент проскальзывания заготовки по кругу. Эксперименты показали, что когда количество обрабатываемых заготовок большое и полностью перекрывает поверхность абразивного круга, его износ почти линеен с возрастанием от центра к периферии.

При условиях, когда заготовки при обработке прикрывают часть поверхности, износ инструмента неравномерный с образованием лунки износа на некотором расстоянии от периферии (Рис 2.17).

Для обеспечения равномерного износа абразивного инструмента необходимо, чтобы путь трения-  $S_L$  был одинаков при любом радиусе  $R_i$ . Путь трения зависит от продолжительности контакта в данном радиусе. Для его изменения использованы направляющие пластины 3, перемещающие заготовки с периферии к центру и направляющие пластины 4, перемещающие заготовки из центра к периферии. Работа изнашивания и соответственно величина съема с поверхности зависят от продолжительности контакта заготовки в заданном радиусе. Чтобы обеспечить одинаковый съем и устранить неравномерность изнашивания, необходимо обеспечить одинаковую работу при всех радиусах  $R_i$ .

$$A_{тр} = F_{тр} w_{kp} R_i t_i k \quad (2.11)$$

Это возможно, когда произведение радиуса и время контакта в заданном радиусе сохраняются постоянными. Данное условие выполнимо при

$$R_{i1}/ R_{i2} = t_{i2}/ t_{i1} \quad (2.12)$$

Время  $t_i$  зависит от значения углов наклона направляющих пластин.

Значение  $t_i$  можно определить экспериментально.

В качестве заготовок использовались кубики, нарезанные из оникса и лазурита.

На основе рассмотренных выше устройств с учетом их недостатков, также с целью повышения производительности и точности обработки деталей, типа шаров, повышения долговечности абразивного инструмента путем обеспечения его равномерного изнашивания предложена новая конструкция станка для формообразования шариков из самоцветных камней.

В предлагаемой конструкции в качестве вращающегося дна используется абразивный круг или алмазная планшайба. Стенки, образующие барабан, при этом расположены перпендикулярно к его вращающему дну, так как при этом обеспечиваются лучшие условия для обработки. Для обеспечения равномерного изнашивания инструмента в неподвижной верхней части монтированы пластины, перемещающие заготовки от центра к периферии и из периферии к центру.

Устройство поясняется чертежами, рисунок 2.18а и 2.18б. На рисунке 2.18а показано устройство в разрезе А-А, а на рисунке 2.18б показан вид сверху.

Устройство состоит из абразивного круга 1, приводного вала 2, пластины для перемещения заготовок к периферии круга 3, пластины для перемещения заготовок к центру круга 4, барабана 5, держателей барабана 7, державки 8, болтов 9.

Вращающее дно, представляющее собой опорный абразивный круг 1 (рисунок 2.18), приводится во вращательное движение приводным валом 2. Над абразивным кругом с некоторым зазором установлены пластины 7, 3 перемещающие заготовки к периферии и 4 из периферии в центр. Пластины, перемещающие заготовки от периферии к центру, прикреплены

непосредственно внутри барабана 5, а пластины 4, перемещающие заготовки от центра к периферии круга, монтированы в стержнях 8, прикреплённых к верхнему торцу барабана. Барабан 5 посредством ушек и стоек 7 и болтов 9 прикрепляется к станине станка.

Устройство работает следующим образом. Вначале заготовки размещают внутри барабана. В качестве заготовок служат предварительно обработанные галтованные шары 6. При вращении дна 1, представляющего собой абразивный круг, заготовки приводятся в движение.

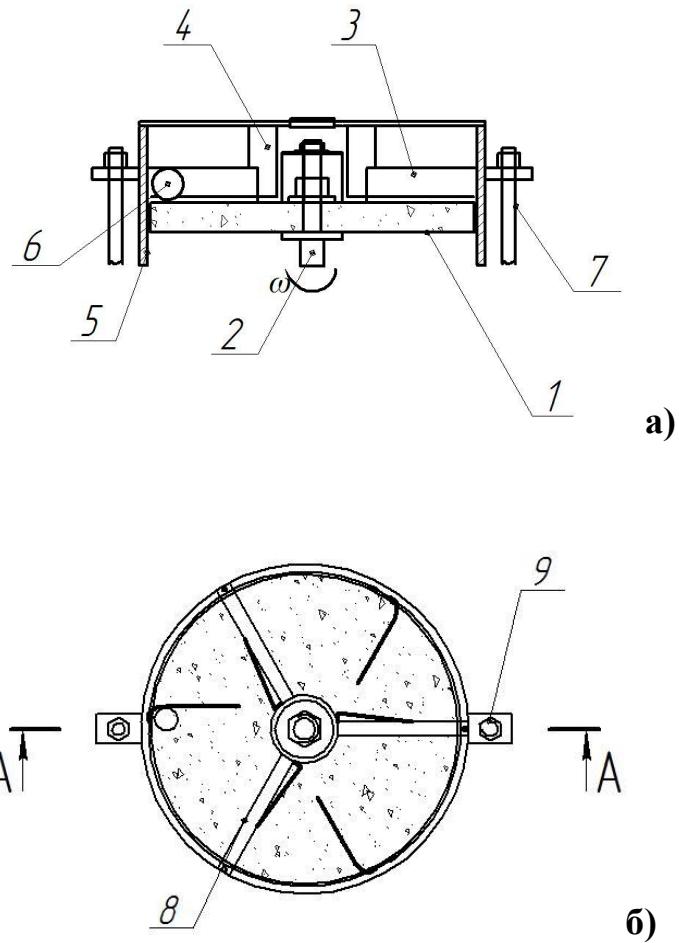


Рисунок 2.18. Станок для центробежной абразивной обработки с направляющими пластинами

Заготовки при соприкосновении с неподвижными пластинами 3 и 4 под действием силы резания перемещаются вдоль пластины и одновременно вращаются вокруг своих осей. Направление перемещения зависит от угла расположения пластины относительно радиуса круга в точке соприкосновения. Пластины расположены таким образом, что перемещают заготовки от

периферии круга к центру (пластины прикреплены непосредственно внутри барабана 5) и от центра к периферии, (пластины, монтированные в стержнях 8, прикреплённых к верхнему торцу барабана). 7

После окончания обработки деталей 6 отключают вращение шпинделя 2 и выгружают детали. Данное устройство за счет трехосного вращения обеспечивает качественную обработку наружной поверхности деталей типа сферы.

При отсутствии направляющих пластин траектория движения шариков определяется внутренней поверхностью барабана. В данном случае внутренняя поверхность барабана составляет окружность. Заготовки, перемещаясь по окружности, соприкасаются с ограниченным участком абразивного круга. В этом случае абразивный круг изнашивается неравномерно. На рисунке 2.17 приведен износ абразивного круга, происходящий по этой причине. Направляющие пластины 3 обеспечивают перемещение заготовок от периферии к направлению центра, а пластины 4. Наоборот, их перемещение от центра к периферии. Чтобы равномерно изнашивался абразивный круг, необходимо, чтобы работа силы трения во всех точках соприкосновения с заготовками была одинаковой. Работу силы трения можно определить как

$$A_{tp} = F_{tp} S_L, \quad (2.13)$$

где  $F_{tp}$  -сила трения заготовки при перемещении по инструменту,  $S_L$ - путь трения. Путь трения зависит от расстояния месторасположения заготовки до оси вращения круга положения заготовки в абразивном кругу. При частоте вращения круга равной  $w_{kp}$   $S_L = w_{kp} R_i t_i k$  (2.14), где  $w_{kp}$  – частота вращения круга,  $R_i$  - расстояние от месторасположения заготовки до оси вращения круга,  $t$  - продолжительность нахождения заготовки в контакте при радиусе  $R_i$   $k$  – коэффициент проскальзывания заготовки по кругу.

Эксперименты показали, что когда количество обрабатываемых заготовок большое и полностью перекрываетяется поверхность абразивного круга, его износ почти линеен с возрастанием от центра к периферии.

В реальных условиях, когда заготовки при обработке прикрывают часть поверхности износа инструмента неравномерно с образованием лунки износа на некотором расстоянии от периферии.

Для обеспечения равномерного износа абразивного инструмента необходимо, чтобы путь трения-  $S_L$  был одинаков при любом радиусе  $R_i$ . Путь трения зависит от продолжительности контакта в данном радиусе. Для его изменения использованы направляющие пластины 3, перемещающие заготовки с периферии к центру, и направляющие пластины 4, перемещающие заготовки из центра к периферии. Работа изнашивания и соответственно величина съема с поверхности зависят от продолжительности контакта заготовки в заданном радиусе. Чтобы обеспечить одинаковый съем и устранить неравномерность изнашивания, необходимо обеспечить одинаковую работу при всех радиусах  $R_i$ .  $A_{tp} = F_{tp} w_{kp} R_i t_i k$  (2.15).

Это возможно, когда произведение радиуса и время контакта в заданном радиусе сохраняются постоянными. Данное условие выполнимо при  $R_{i1}/R_{i2} = t_{i2}/t_{i1}$ . Время  $t_i$  зависит от значения углов наклона направляющих пластин.

Значение  $t_i$  можно определить экспериментально.

При экспериментальных исследованиях в качестве заготовок использовались кубики, нарезанные из ониксита и лазурита.

Использование данного устройства позволяет существенно повысить производительность и качество обработки заготовок из самоцветных камней, также многократно возрастает срок службы шлифовального круга за счет равномерного его изнашивания по всей рабочей поверхности. 7

Проведенные однофакторные эксперименты позволили установить основные факторы, влияющие на производительность и точность обработки.

Эти факторы следующие: скорость вращения инструмента, зернистость связанного абразива, продолжительность обработки, углы наклона направляющих пластин к радиусу от центра вращения до данной точки.

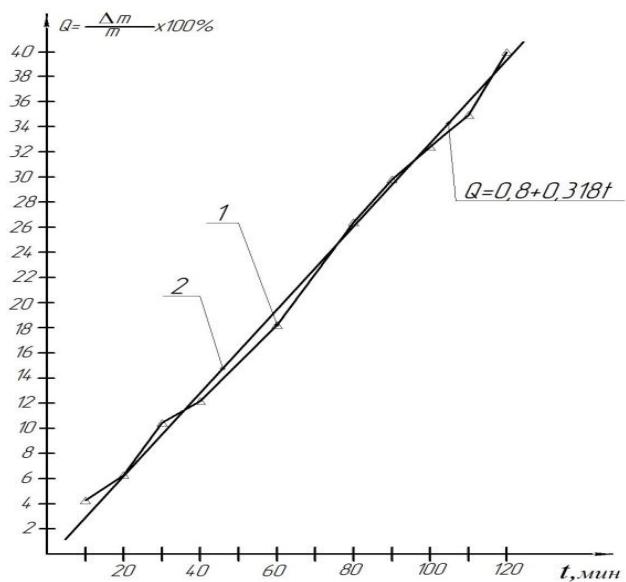


Рисунок 2.19. Зависимость величины съёма от продолжительности обработки при сухой обработке оникальцита

1.Экспериментальные данные.

2.Математическая обработка результатов эксперимента

$V=10\text{м/сек}$  (477об/мин); зернистость абразива -  $Z=800$  мкм.

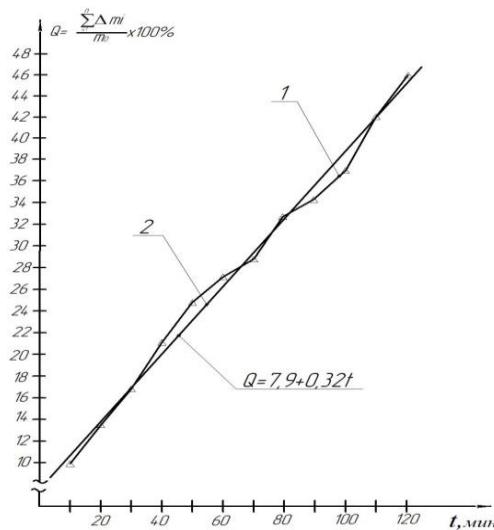


Рисунок 2.20. Зависимость величины съёма от продолжительности обработки оникальцита в жидкой среде

1.Результаты эксперимента 2. Аппроксимация результатов эксперимента

$V=10\text{м/сек}$  (477об/мин); зернистость абразива-  $Z=700$  мкм.

Производительность обработки также зависит от линейной скорости инструмента и размера абразивных зерен шлифовального круга. При использовании абразива мелкой фракции производительность невысокая с ростом размеров зерен абразива величина съема и соответственно производительность обработки возрастает. Например, при обработке офита,

когда зернистость в пределах 800-1200 мкм, производительность наибольшая. При зернистости абразива больше 1200 производительность обработки постепенно снижается. Обработка лазурита при различной зернистости абразива показала, что наибольшая производительность достигается при размерах зерен в пределах 660- 900мкм. В случае дальнейшего повышения зернистости абразива производительность обработки снижается.

### **2.3. Заключение к главе II**

1. Рассмотрены вопросы изготовления шаровидных изделий из самоцветных камней. В том числе рассмотрены: этапы формирования шариков из самоцветных камней; резание брусков на кубики из исходного сырья; галтовка кубиков; формообразование шариков шлифованием; полировка шариков.

2. При галтовке в барабанах кубиков из самоцветных камней установлено, что интенсивнее снимаются ребра и вершины кубиков, что приближает их по форме к шарикам.<sup>6</sup> На интенсивность съема влияет множество факторов, в том числе частота вращения барабана, количество загрузки, количество абразива на 1кг массы исходных заготовок, соотношение жидкой и твердой фазы при обработке и т.д. На основе анализа динамики процесса обработки в галтовочных барабанах определили максимально возможное число оборотов, при котором обеспечивается наибольшая производительность обработки.

3. Проведены теоретические исследования процесса шлифования шариков и рассмотрены различные схемы обработки, в том числе: обработка шариков в галтовочных барабанах с горизонтальной и наклонной осью вращения; 3 планетарно-центробежная обработка<sup>4</sup>; обработка с использованием двухдискового шлифовального станка; формообразование шаровидных изделий в специальном станке между отрезками труб; роторно-центробежная обработка; формообразование шариков на станке с направляющими пластинами (патенты № ТJ (1199).

Исследования показали, что галтовка в барабанах с горизонтальной и наклонной осью вращения эффективна при округлении граней и острых

заготовок из самоцветных камней. При данном способе обработки точность формы не обеспечивается. Поэтому использование данных станков для формообразования шариков неэффективно.

4. Устройство для центробежной абразивной обработки (патент № ТJ (1199) позволяет многократно увеличить срок службы шлифовального круга за счет равномерного его изнашивания по всей рабочей поверхности, также существенно повысить качество и производительность обработки заготовок из самоцветных камней.

5. Исследование способа обработки шаровидных заготовок из самоцветных камней между отрезками из двух труб показало, что данный метод образования сферических поверхностей эффективный при формировании сферической поверхности, имеющих небольшие исходные отклонения формы.

6. Образование исходной формы заготовок, пригодной для дальнейшей обработки, этим методом выполняется вручную и трудоемкий процесс; трудозатраты для получения правильной сферической поверхности значительны; конечный результат - получение качественного изделия зависит от умения и навыков исполнителя. Преимущество данного метода заключается в том, что данный метод обеспечивает наилучшую геометрию сферических поверхностей по сравнению с другими методами.

6. При центробежной обработке на станках с вращающимся дном наблюдается неравномерный износ инструмента, снижающий эффективность обработки.

На основе анализа существующих методов предложен способ центробежной обработки, при котором заготовки при помощи направляющих пластинок направляются от периферии к центру и от центра к периферии (Патент № ТJ 1199), что устраняет неравномерность износа инструмента при обработке.

## **ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ, ПРОВЕДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

При экспериментальных исследованиях обработки самоцветных камней использованы следующие оборудование: станок для планетарной центробежный обработки; центробежно-абразивный станок с вращающимся дном в виде абразивного инструмента; центробежный станок с вращающимся дном и направляющими пластинами; измерительный прибор-проектор оптического профиля Optomech Profile Projector Model 400); галтовочные барабаны разного объема с горизонтальной осью вращения; весы электронные; микрометры 0-25мм и 25-50мм с ценой деления 0,01мм.

Фотографии станков приведены в приложении.

### **3.1. Оборудования, используемые при экспериментальных исследованиях**

Процессы центробежной абразивной обработки широко применяют в технологическом процессе обработки деталей для улучшения параметров качества поверхности, а также для округления острых граней и удаления заусенцев. Существует множество способов центробежной абразивной обработки, один из которых обработка в контейнерах с вращающимся дном [36, 3,40,41]. При этом способе заготовкам сообщается сложное пространственное движение. Обработка происходит за счет относительного скольжения заготовок и абразивной массы. Чем больше скорость относительного скольжения абразив-заготовка соответственно, тем большее производительность обработки [87,88,89].

Традиционные методы центробежной абразивной обработки высокопроизводительны, но не пригодны при обработке самоцветных камней. Их применение может привести к поломке и появлению дефектов на поверхности обрабатываемых изделий. Кроме того, эти методы не обеспечивают достижение требуемой формы и размера изделий. Усовершенствование этих методов с целью высокопроизводительной обработки хрупких материалов и самоцветных камней является актуальной задачей. Проведённый комплекс экспериментальных и теоретических исследований позволил разработать

наиболее производительные методы обработки, обеспечивающие качественную обработку изделий из самоцветных камней.

В работах [42,43,44] представлены новые методы центробежной абразивной обработки, которые имеют высокую производительность. Также приведены результаты исследования, изыскание возможности их использования для улучшения геометрической формы и точности размеров. При обработке на этих станках требуется, чтобы заготовки имели исходную форму, приближенную к сфере. Такие заготовки изготавливают из самоцветных камней путем нарезки на кубики и с последующей обработкой на галтовочных барабанах или центробежно-планетарных станках. С учетом недостатков существующих методов центробежной абразивной обработки для формообразования галтованных кубиков в шары нами предложена и защищена патентом на изобретение конструкция устройства, которая не имеет недостатков вышеприведенных устройств. Данное устройство обеспечивает повышение производительности и точности обработки деталей, типа шаров, повышает долговечность абразивного инструмента путем обеспечения его равномерного изнашивания [66].

### **Конструкция и принцип работы станка**

Рабочая часть станка имеет следующие составляющие: абразивный круг 2, направляющие пластины для перемещения заготовок к периферии круга 3, направляющие пластины для перемещения заготовок к центру круга 4, барабан 5, держатели барабана 6, гайки, фиксирующие положение барабана при обработке 7. Барабан 5 посредством ушек и держателей 6 и гайки 7 (рисунок 3.1) прикрепляется к станине станка. Пластины 4 прикреплены непосредственно в барабане, а пластины 3 монтированы в стержнях, прикреплённых к верхнему торцу барабана. Абразивному инструменту 2 сообщается вращательное движение от шпинделя станка 8. Вращение шпинделю сообщается от электродвигателя 9 посредством ременной передачи 10 редуктора 11, муфты 12. Панель управления станка 13 встроена в корпусе 14(рисунок 3.1).

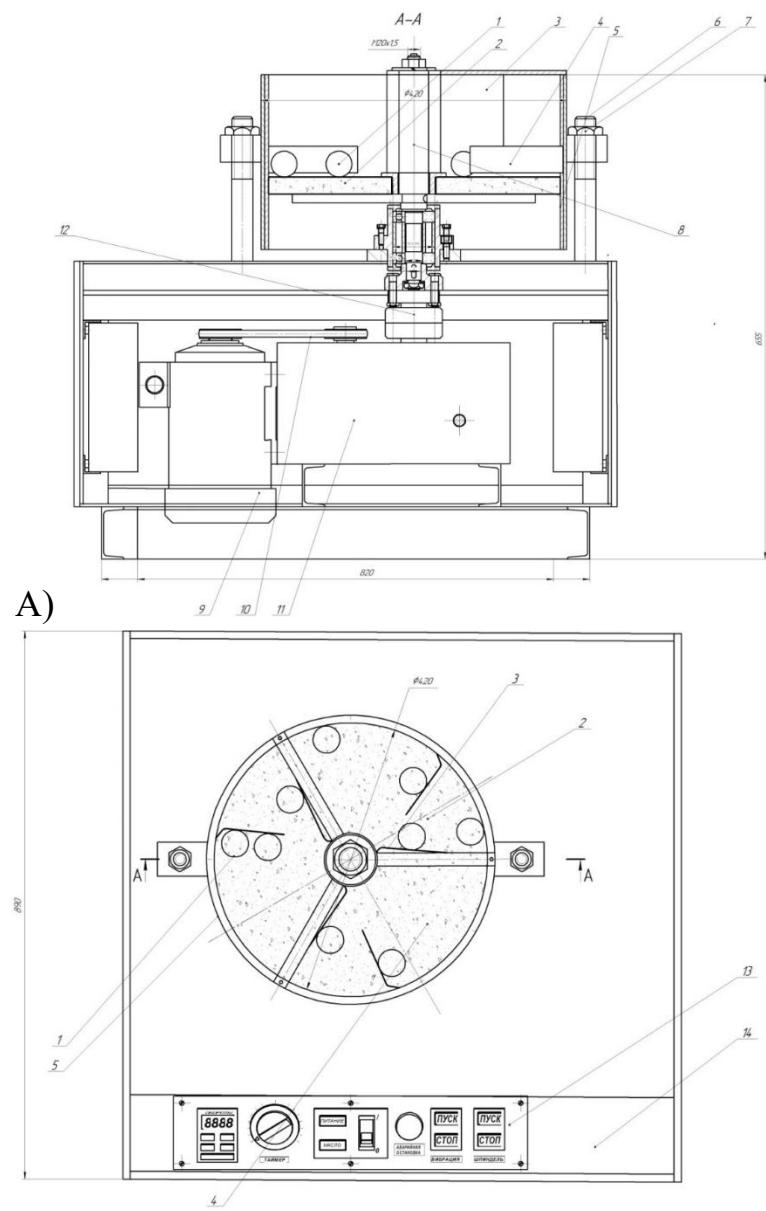
Станок работает следующим образом. В рабочей зоне загружают обрабатываемые заготовки 1, абразивный круг или алмазную планшайбу 2. При вращении инструмента заготовки также начинают вращаться и перемещаться по его поверхности. В качестве заготовок в данном случае используют галтованные кубики из самоцветных камней. В качестве инструмента служит абразивный круг 1. Заготовки, взаимодействуя с пластинами в зависимости от угла наклона пластины относительно радиуса инструмента в данной точке, перемещаются относительно их с определенной скоростью. Изменяя угол наклона пластины, можно регулировать продолжительность контакта заготовки с инструментом. При относительном скольжении заготовок по поверхности инструмента происходит съем материала с их поверхности. Если отсутствовали направляющие пластины, траектория движения шариков определялась бы внутренней поверхностью барабана, имеющей форму окружности. Заготовки под действием силы резания, перемещаясь по окружности, соприкасаются с ограниченной зоной абразивного круга. В этом случае за счет износа на поверхности круга образуется канавка, которая снижает срок его эксплуатации. Направляющие пластины способствуют равномерному износу инструмента, также повышению точности формообразования изделий за счет обеспечения трехосного их вращения.

Для формообразования галтованных кубиков в шары нами предложен станок новой конструкции [66].

Принцип работы станка приведен на рисунке 1. В рабочей зоне загружают обрабатываемые заготовки. В данном случае предварительно галтованные кубики из самоцветных камней. В качестве инструмента служит абразивный круг или алмазная планшайба 4. Вращение шпинделю станка ( 8 ) и инструменту сообщается от электродвигателя 9 посредством ременной передачи 10 редуктора 11 и муфты 12. В рабочей зоне установлены пластины, направляющие заготовки от центра к периферии 3 и от периферии к центру 4. Направляющие пластины прикреплены к неподвижному барабану ( 5 ). Барабан удерживается в рабочем положении стержнями ( 6 ) и закрепляется болтами 7.

Принцип работы станка показан на рисунке 3.1.

На рисунке 3.1а показан вид станка сверху. При вращении абразивного круга 1 на заготовки действуют силы трения и центробежной силы, под действием которых они перемещаются к периферии и прижимаются к стенке неподвижного барабана 2. При вращении абразивного круга по часовой стрелке шарики также перемещаются в данном направлении. При отсутствии направляющих пластин траектория движения шариков определяется внутренней поверхностью барабана. В данном случае внутренняя поверхность барабана составляет окружность.



Б)

Рисунок 3.1. Станок для формообразования шариков из самоцветных камней

Заготовки, перемещаясь по окружности, соприкасаются с ограниченным участком абразивного круга. В этом случае абразивный круг изнашивается неравномерно. Направляющие пластины 3 обеспечивают перемещение заготовок от периферии к центру, а пластины 4, наоборот, их перемещение от центра к периферии. Чтобы равномерно изнашивался абразивный круг, необходимо, чтобы работа силы трения во всех точках соприкосновения с заготовками была одинаковой. Работу силы трения можно определить как  $A_{tp} = F_{tp} S_L$ , (3.1)

где  $F_{tp}$  -сила трения заготовки при перемещении по инструменту,  $S_L$ - путь трения. Путь трения зависит от расстояния месторасположения заготовки до оси вращения круга положения заготовки к абразивному кругу. При частоте вращения круга равной  $w_{kp}$   $S_L = w_{kp} R_i t k$  (3.2)

где  $w_{kp}$  – частота вращения круга,  $R_i$  - расстояние от месторасположения заготовки до оси вращения круга,  $t$  - продолжительность нахождения заготовки в контакте при радиусе  $R_i$   $k$  – коэффициент проскальзывания заготовки по кругу. Эксперименты показали, что когда количество обрабатываемых заготовок много и полностью перекрывает поверхность абразивного круга, его износ почти линеен с возрастанием от центра к периферии (рис.3.2).

В реальных условиях, когда заготовки при обработке прикрывают часть поверхности, износ инструмента неравномерный с образованием лунки (рис.3.3). Пластина, перемещающая заготовки к центру от периферии, расположена под углом  $\alpha$  к радиусу в данной точке. Силу, действующую на пластину со стороны шарика  $F_1$ , можно разложить на составляющие  $F_{1x}$  и  $F_{1y}$  (рис. ). Сила  $F_{1x}$  толкает шарик от периферии к центру. Величина этой силы зависит от коэффициента трения шарика по абразивному кругу и величины угла  $\alpha$ . Если  $\alpha=0$  сила перпендикулярна пластине и шарик не передвигается по пластине. В этом случае  $F_1 = F_{tp,ш.}$  и направлено противоположно ему.

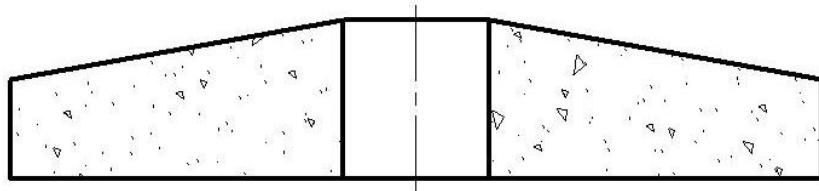


Рис.3.2. Изнашивание инструмента при обработке мелких заготовок и  
отсутствие направляющих пластин

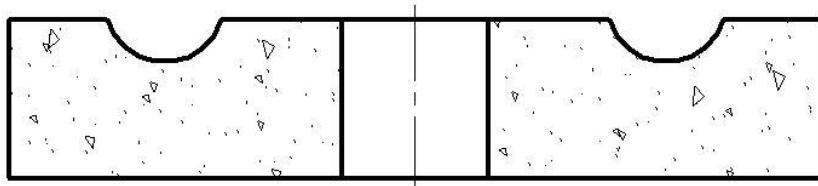


Рис.3.3. Изнашивание инструмента при обработке крупных заготовок (шаров) и  
отсутствие направляющих пластин

Под действием этих сил происходит вращение шарика вокруг своей оси. Сила трения шарика по пластине  $F_{тр.пл.}$  препятствует вращению шарика.

По этой причине происходит скольжение шарика по поверхности круга. Величина силы трения  $F_{тр.ш.}$  зависит от коэффициента трения материала пластины. Чем больше сила трения  $F_{тр.пл.}$ , тем большее производительность обработки. Для увеличения коэффициента трения к поверхности пластины приклеиваем резины.

Обеспечение равномерности изнашивания инструмента является важной задачей и от его решения зависят снижение расхода инструмента, улучшение качества обработки и себестоимость изделий. Экспериментально установлено, что за счет изменения угла наклона направляющих пластин можно регулировать процесс изнашивания инструмента и обеспечить равномерности его изнашивания. Этот вопрос более подробно рассматриваем в четвертой главе диссертации.

### **3.2. Материалы и образцы, используемые при проведении экспериментов.**

#### **Обрабатываемые материалы**

В качестве заготовок для обработки использовались предварительно изготовленные кубики из оникса и лазурита. Рассмотрим свойства этих минералов.

Оникс — непрозрачный минерал с сетчатым рисунком зеленого и светло-зеленого цветов. Встречаются также камни желтого и голубых оттенков. Самоцвет обладает шелковистым или стеклянным блеском. Оникс используется для внутренней отделки интерьеров и экстерьеров, а также изготовления различного рода памятников, поделок, украшений и сувениров[91]. Месторождения оникса имеются также в Таджикистане. Данный самоцветный камень широко используется в ювелирной промышленности при изготовлении различных украшений и сувениров, в том числе бус, четок, брелоков и др.

Использованный нами минерал имеет следующие характеристики:

Твердость (Шкала Мооса) 3,5

Плотность 2,6 г/см<sup>3</sup>

Обрабатываемость хорошая

Цвет желто-зеленый.

Выбор оникса и лазурита для экспериментов обусловлен их широким использованием при изготовлении украшений и доступностью.

Химическая формула лазурита - $\text{Na}_6\text{Ca}_2(\text{AlSiO}_4)_6(\text{SO}_4,\text{S},\text{CO}_3)_2$ . Данный минерал известен под такими именами, как лазурит, лазуревый камень, ляпис-лазурь, реже бухарский камень. Лазурит - непрозрачный минерал от синего до голубовато-серого или зеленовато-серого цвета, подкласса каркасных силикатов. Лучшими считают камни сочного синего цвета или сине-фиолетовые, а также насыщенно голубые.

Для экспериментальных исследований заготовки из лазурита изготавливались в виде кубиков с исходным размером в пределах 15÷80 мм.

Использованный нами минерал имеет следующие характеристики:

Твердость (Шкала Мооса) 5,5

Плотность 2,4 г/см<sup>3</sup>

Показатель преломления 1,5

Обрабатываемость хорошая

Цвет светло-голубой.

## **Абразивные материалы**

В качестве абразивного материала применены шлифпорошки и микропорошки из электрокорунда. На производительность и качество обработки сильное влияние оказывают размеры зерен абразива. Средний размер зерен абразива принято называть «зернистость абразива». По зернистости абразивы делятся на шлифовальные зерна, шлифовальные порошки и микропорошки.

Исходя из зернистости абразивы обозначаются номерами, которые определяются исходя из размера квадратных ячеек сеток, через которые проходит зерно. Размеры в ситах выбираются исходя из ряда предпочтительных чисел с модулем 10 или с модулем 2. Абразивные зерна имеют определенный диапазон рассеивания размеров и обозначаются символами, например М10/7. Буква М обозначает микропорошок, цифра 10 верхний предел абразивных зерен в микрометрах. Верхний и нижний пределы размеров абразивных зерен определяются размером сита, через которое зерно проходит, нижний предел размера абразивных зерен в микрометрах соответствует размеру ячейки в сите, на котором зерно задерживается. Также допускается наличие небольшого количества более крупных и более мелких зерен [29].

При контроле размеры зерна определяются при помощи микроскопа. Примеры обозначения зерен абразива: - шлифпорошок электрокорунд 8А, размеры зерен 0,1-0,08 мм.; микропорошок М40, размеры зерен 40-28 микрометр.

При проведении экспериментов использовали следующие абразивные порошки: шлифпорошки из электрокорунда 8А, 10А, 12А, также микропорошки М40, М28, М14, М7 и М5.

### **3.3. Методика проведения эксперимента на станках для центробежной абразивной обработки**

Экспериментальные исследования проводились на следующих станках: на галтовочном барабане, планетарно-центробежном станке, центробежном станке с вращающимся дном из абразивного материала и центробежном станке с вращающимся дном и направляющими пластинами. [49, 50, 92, 93].

Производительность процесса обработки можно определить двумя методами: весовым методом и измерением изменения размеров обрабатываемых заготовок до и после обработки.

При весовом методе производительность определяется путем взвешивания заготовок до и после обработки. Каждый раз при обработке разных партий количество загружаемых заготовок, их плотность отличаются. Для удобства сопоставления результатов обработки разных партий загружаемых заготовок производительность оцениваем в процентах потери исходной массы. Оценка производительности осуществляется следующим образом: когда потеря исходной массы  $\Delta m$ , производительность обработки определяется как  $Q = (\Delta m / m_0) \times 100\% \quad (3.3)$

В формуле 3.3,  $m_0$ - исходная масса,  $\Delta m$ - потеря массы при обработке.

Производительность обработки по данной формуле 3.3 характеризует изменение исходной массы заготовок в процентах. Если процент изменения исходной массы известен, то можно легко определить величину съема в весовом выражении, как  $\Delta m = (Q \times m_0) / 100 \quad (3.4)$

Соотношение объема загрузки к объему рабочей емкости -  $\eta_3$ , определялось исходя из плотности материала заготовок

$$V_m = m / \rho \quad (3.2)$$

где  $m$  - масса загрузки,  $\rho$  - средняя плотность заготовки.

$$\text{В этом случае } \eta_3 = V_m / V_b, \quad (3.3)$$

где  $V_m$ - объем загрузки;  $V_b$ - объем рабочей емкости (барабан галтовочного станка, контейнер планетарно-центробежного станка и т.д.).

### **3.3.1. Методика метрологических исследований**

Измерение параметров заготовок (массы, размеров, отклонения формы) при экспериментах производилось при использовании таких средств измерения, как электронные весы, микрометры 0-25мм и 25-50мм с ценой деления 0,01мм, штангенциркуль36, проектор оптического профиля 400Н (Optomech Profile Projector Model 400Н). 1 Метод измерения прямой. Непосредственно производится измерение заданного параметра соответствующим инструментом.

### **3.3.2. Измерение формы деталей**

Для измерения формы деталей использовались следующие устройства: проекторы оптического профиля, кругломеры, микрометры, штангенциркули и т.д. Для определения погрешности формы деталей использовался проектор оптического профиля 400Н. Данный прибор служит для надежного и быстрого контроля формы детали. Основные части устройства - это оптическая система из набора линз, стол для линейных измерений, транспортир поворотный для измерения углов, система проецирования профилей для увеличения (при необходимости) и измерения размеров. С использованием данного устройства можно производить измерения линейных размеров, измерение углов, измерение профиля и шага резьбы, также погрешностей формы, таких как параллельность и перпендикулярность расположения элементов детали, отклонения от округлости. Имеются разные проекторы оптического профиля, например, цифровые профильные проекторы модели SMART PROJECTOR 108, EASY PROJECTOR 168, профильный проектор SMART SHAPE PRO, HD-U803, CPJ-3020 и др. Для измерения формы заготовок нами использован проектор оптического профиля 400Н.

Для измерения заготовки устанавливаются в измерительной позиции стола. При измерении перемещения стола в фокусном направлении необходимо добиваться четкости изображения контура детали. В противном случае точность измерения будет низкая. Использованием данного устройства можно определить отклонение контура деталей и размеры с точностью 0,001мм. Измерение производится по проекции профиля детали на экран. Экран профильного

проектора имеет шкалу измерения линейных размеров, также радиально градуирована на  $360^\circ$ , что обеспечивает измерение угловых размеров.

Для измерения отклонения заготовок от сферичности в качестве контрольных средств использовались оптикатор 01-П с ценой деления 0,1 мкм и проектор оптического профиля 400Н (Optomech Profile Projector Model 400Н).

Измерения формы заготовок до и после обработки производились использованием оптикатора 01-П. Дополнительно к этому из каждой партии совместно с обрабатываемыми заготовками по пять штук измерялись использованием проектора оптического профиля 400Н (Optomech Profile Projector Model 400Н).

Измерение параметров шероховатости поверхностей заготовок производилось при помощи профилограф-профилометра мод. 201.

Измерение отклонения формы производится в следующем порядке:

1. Вначале визуально оцениваем форму заготовки, определяем направление наибольшего и наименьшего диаметров;
2. Для определения отклонения формы исходных заготовок производим измерения в направлениях наибольшего и наименьшего размеров;
3. Для оценки отклонения шаровидных изделий определяется наименьший и наибольший диаметры для каждого образца;
4. Оценка изменения формы производится измерением до и после обработки;

Для оценки изменения величины формы в результате обработки производим величину отклонения до обработки  $\delta_1=L_0-L_1$  и после обработки  $\delta_2=L_{01}-L_{1.1}$ . – (рис. 3.4).

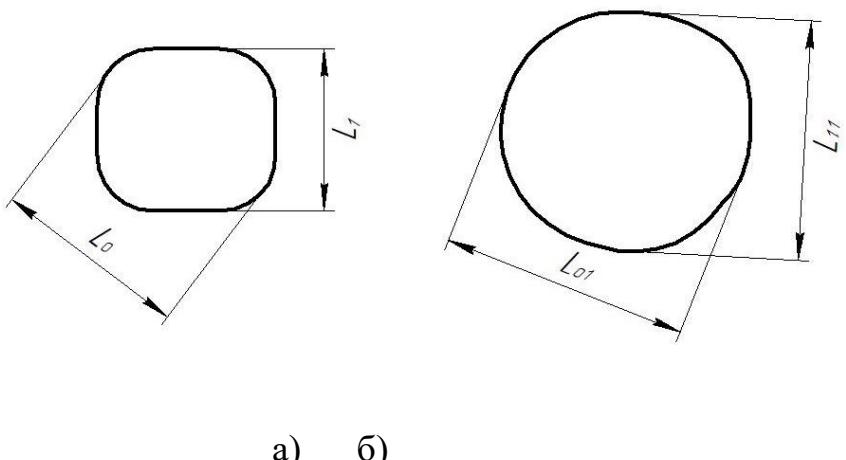


Рисунок 3.4 – а) измерение размеров до обработки,  
б) измерение размеров после обработки.

Тогда исправления формы заготовок в процентах-  $\delta$  можно определить как  $\delta = ((L_0 - L_1) - (L_{01} - L_{1.1})) / (L_0 - L_1) \times 100\% \quad (3.4)$

В формуле 3.4.  $L_0, L_1$  – наибольший и наименьший размеры заготовки до обработки,  $L_{01}, L_{1.1}$  – наибольший и наименьший размеры заготовки после обработки.

### 3.3.3. Измерение шероховатости поверхности

Шероховатость поверхности является одним из показателей качества поверхности деталей. Под качеством поверхности понимают совокупность показателей поверхностного слоя деталей. Показатели качества поверхности делятся на геометрические и физико-химические параметры.

Геометрические параметры качества поверхности делятся на отклонение формы, волнистость и шероховатость. Для изделий из самоцветных камней важнейшим параметром их качества является шероховатость обработанных поверхностей. От шероховатости поверхности зависит способность отражать свет, блеск, товарный вид изделия. Влияние микрогометрических отклонений важно для изделий, состоящих из правильных геометрических фигур, например, бус или четок из шариков. Волнистость также рассматривается с точки зрения

влияния на товарный вид изделия. Для параметра отклонения формы отношения длины поверхности к высоте отклонения ( $L/h > 1000$ ).

Для волнистости обработанных поверхностей соответственно  $L/h = 50...1000$ .

К шероховатости поверхности относятся отклонения поверхности, в которых отношение шага неровностей к их высоте меньше 50 ( $L/h < 50$ ). Факторы, влияющие на шероховатость поверхности следующие: режимы обработки, вибрация большой частоты в технологической системе, следы режущей кромки инструмента, пластическая деформация обрабатываемой поверхности. Для изделий из самоцветных камней шероховатость является одним из важных параметров, определяющих их качество. От параметров шероховатости зависят такие показатели изделий, как гладкость поверхности, способность отражать солнечные лучи, блеск и т.д.

Параметры шероховатости поверхности, регламентированные согласно ГОСТ 2789-73, следующие: среднее арифметическое отклонение профиля-  $R_a$ ; высота неровностей профиля по десяти точкам-  $R_z$ ; максимальная высота профиля в пределах базовой длины-  $R_{max}$ ; средний шаг неровностей по средней линии-  $S_m$ ; шаг неровностей по вершинам-  $S_i$ ; относительная опорная длина профиля-  $t_p$ . Из этих параметров на процессы отражения света сильно влияют  $R_a$  и  $R_z$ , тем самым формируют зрительное восприятие качества обработанной поверхности. Поэтому при обработке изделий необходимо формировать требуемые значения параметров  $R_a$  и  $R_z$ .

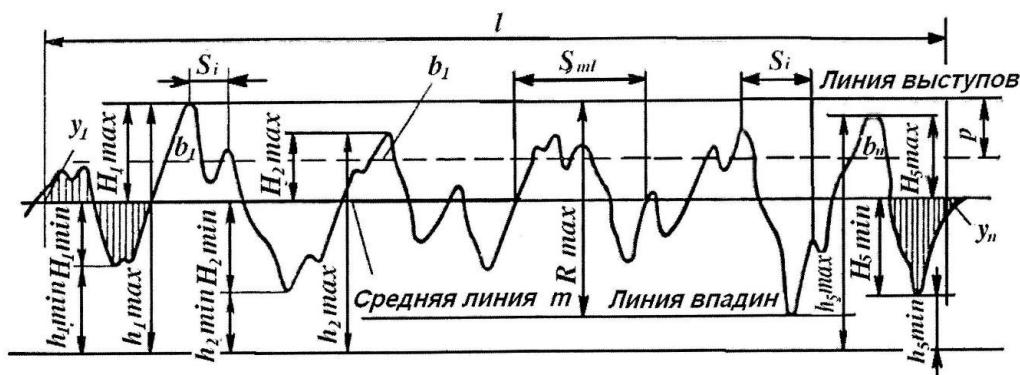


Рисунок 3.5. Профилограмма поверхности обработанных изделий

Значение  $R_a$  определяется по следующей формуле 3.8.(рисунок 3.5):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y_i| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad (3.8)$$

В данной формуле:  $Y_i$  –расстояние от точки профиля до средней линии без учёта алгебраического знака;  $n$ - количество измеренных значений.

Высота неровностей профиля по десяти точкам-  $R_z$  определяется по следующей формуле:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |H_{ei}| + \sum_{i=1}^5 |H_{hi}|}{5} \quad (3.9)$$

Где,  $H_{bi}$ - расстояние от средней линии до вершины  $i$ -ой высоты;

$H_{hi}$ - расстояние от средней линии до вершины  $i$ -ой впадины.

Для оценки параметров шероховатости применяют следующие методы:

- метод визуальной оценки путем сравнения с образцами;
- метод определения шероховатости ощупыванием поверхности при помощи профилометра или профилографа;
- использование интерференционных приборов.

Из этих методов наиболее точные результаты достигаются при использовании метода ощупывания. Поэтому этот метод широко используется. Приборы для определения шероховатости методом ощупывания делятся на профилометры, которые измеряют и выдают цифровое значение результатов измерения, и профилографы, которые создают графическое изображение измеряемой поверхности детали в увеличенном масштабе. Существуют также приборы, одновременно выполняющие функции профилографа и профилометра. Использованный нами профилограф-профилометр, модель 201 имеет следующие части: измерительное устройство, самозаписывающий прибор и электронный блок с показывающими приборами. Ощупывание поверхности производится алмазной иглой с малым радиусом закругления10. Механическое

перемещение алмазной иглы преобразуется в электрическую, передается в измерительное устройство, увеличивается и записывается на специальную ленту.

Стол прибора позволяет перемещать детали в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях, также осуществлять поворот. Профилографы предназначены для графического изображения профиля поверхности. Изображение профиля производят на специальной бумаге – перфоленте. При измерении устанавливаются масштабы вертикального и горизонтального увеличения. Длина участка детали, на котором производится профилографирование, называют базовой длиной. Базовая длина выбирается в зависимости от величины шероховатости. Согласно ГОСТ 2789-73 значение базовой длины находится в пределах от 0,08 до 8 мм. В нашем случае базовая длина составляет 3,0мм[29].

В зависимости от значения параметров контролируемой шероховатости задается масштаб увеличения профилограммы в горизонтальном(ГУ) и вертикальном направлениях(ВУ).

Масштаб увеличения в горизонтальном направлении задается величиной скорости перемещения щупа и бумаги. Его можно подсчитать по следующей формуле:

$$ГУ = \frac{V_{\delta}}{V_{\sigma}}, \quad (3.10)$$

В данной формуле  $V_{\delta}$  - скорость перемещения перфоленты;  $V_{\sigma}$  - скорость перемещения щупа по измеряемой поверхности.

Кратность увеличения в вертикальном направлении составляет от 200 до 100000 и устанавливается перед измерением.

При измерении нами параметра  $R_z$  вертикальное увеличение равнялось 10000, а горизонтальное - 80.

Параметр  $R_z$  определяется из профилограммы поверхности по значениям десяти точек - пять выступов и пять впадин (формула 3.9) с учетом масштаба увеличения.

В нашем случае определение  $R_z$  осуществлялось по меченным заготовкам измерением - до обработки и после обработки. Для проведения экспериментов использовались заготовки исходной формы в виде кубиков из ониксита с гранями 25мм.

Общее количество заготовок составляло 10 штук, в каждой из которых произведено по 5 измерений.

Для оценки степени достоверности результатов измерения параметров  $R_a$  и  $R_z$  применялась методика, приведенная в работах [28,94,95].

Выбор числа участков измерений производился по формуле:

$$n_y = \frac{Z^2 \cdot R_R}{3 \cdot \tilde{\Delta}^2} \quad (3.11)$$

В данной формуле  $Z$  - аргумент функции Лапласса, определяемый по таблице для этой функции, исходя из отношения  $\Phi_o = \frac{\alpha}{2}$ . В данном выражении  $\alpha$  - выбранная степень достоверности. Для степени достоверности  $\alpha = 0,95$  значение  $\Phi_o = 0,475$ ;  $Z = 1,96$

$R_R$  - размах варьирования определяется как разность наибольшего и наименьшего значения параметра на трех участках.

$\tilde{\Delta}$  - допустимое значение погрешности профильной оценки истинного максимального значения параметра шероховатости данной поверхности по его максимальному значению, полученному при измерениях. Для рассматриваемого случая количество секций измерения можно определить [28]:

$$n_y = 1,28 \frac{R_R}{\tilde{\Delta}} \quad (3.12)$$

### **3.4. Обработка экспериментальных данных и методика проведения экспериментов**

Для определения взаимосвязей режимов обработки с параметрами производительности качества поверхности и точности формы при центробежной абразивной обработке необходимо провести многофакторный эксперимент. Для этого необходимо:

1. Установить основные факторы процесса обработки, влияющие на производительность обработки и точность формы.
2. Определить значимость факторов и ранжировать их по степени влияния исследуемых параметров процесса обработки.
3. Определить допустимые значения факторов и интервалы их варьирования.
4. Составить план проведения многофакторного эксперимента [28].
5. Анализ полученных данных и построение математической модели процесса обработки.

Определены основные факторы процесса обработки. Эти факторы следующие: линейная скорость инструмента-  $\vartheta$ ; зернистость абразива-  $Z$ ; продолжительность обработки-  $t$ .

Для этого требуется проведение экспериментов при различных сочетаниях факторов. Проведение экспериментов осуществлялось по методике рационального планирования экспериментов [28, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102]. При экспериментальном исследовании процесса обработки применяли метод полного факторного эксперимента, каждый фактор которого варьировался на двух уровнях. Это дает возможность математически описать процесс обработки моделью, включающей факторы их взаимодействия. Верхняя и нижняя границы интервала варьирования фактора обозначены +1 и -1. Экспериментальные планы, в которых все факторы варьируются на двух уровнях, называются планами  $2^k$  [28].

Количество членов уравнения математической модели зависит от количества факторов.

Когда количество факторов равно 2, уравнение имеет следующий вид:

$$\tilde{y} = b_0 + b \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{1,2}x_1x_2 \quad (3.13)$$

Для 3-х факторов уравнение математической модели следующее:

$$\begin{aligned} \tilde{y} = & b_0 + b \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{1,2}x_1 \cdot x_2 + b_{1,3}x_1 \cdot x_3 + \\ & + b_{2,3}x_2 \cdot x_3 + b_{1,2,3}x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_3, \dots, b_i$  определяются по результатам опытов

Математическая модель исследуемого процесса создается в следующем порядке:

- а) Выявление основных факторов, действующих при обработке;
- б) Установление пределов варьирования факторов;
- в) Составление плана проведения эксперимента и выбор математической модели;
- г) Проведение эксперимента, модели и расчет значения коэффициентов математической модели;
- д) Определение статистической значимости коэффициентов математической модели;
- е) Проверка адекватности математической модели.

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

Обработка экспериментальных данных осуществлена использованием методов наименьших квадратов и равных сумм [103,104]. Сущность метода наименьших квадратов заключается в том, что квадрат суммы разности между эмпирическими и расчетными значениями должен быть минимальным. Когда эмпирические значения равны  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ , а расчетные значения по полученной модели -  $f(x_1), f(x_2), f(x_3), \dots, f(x_n)$ , то:  $S = \sum_{k=1}^n [y_k - f(x_k)]^2$  должен быть минимальным. Проведением экспериментов определяют эмпирическую зависимость исследуемого фактора от параметра процесса обработки. Вид уравнения наиболее подходящий для описания эмпирических данных выбирается исходя из характера расположения экспериментальных точек. Например, если вид кривой  $y = f(x)$ , для него выбираем уравнение  $y_3 = F(x, a, b, c, d, \dots)$ . Коэффициенты  $a, b, c, d$  должны удовлетворять условию, при которых расчетные значения  $S = \sum_{k=1}^n [y_k - f(x_k)]^2$  принимали минимальное значение. [28].

Это условие можно записать следующей формулой:

$$E = \int_b^a (y - y_s) \cdot d_x = E(a, b, c, d, \dots) = E_{\min} \quad (3.15)$$

Для определения минимума расхождений между экспериментальными и теоретическими значениями формулу 3.15 рассматриваем как функцию переменных  $a, b, c, d, \dots$  и, приравнивая к нулю все частные производные-

$$\frac{\partial E}{\partial a}, \frac{\partial E}{\partial b}, \frac{\partial E}{\partial c}, \dots$$

получим систему уравнений 3.16

$$\begin{aligned} \int_b^a (y - y_s) \cdot \frac{\partial \cdot y_s}{\partial a} \cdot d_x &= 0 \\ \cdot \int_b^a (y - y_s) \cdot \frac{\partial \cdot y_s}{\partial b} \cdot d_x &= 0 \quad (3.16) \\ \dots \end{aligned}$$

Решая данную систему уравнений, определяем значения коэффициентов  $a, b, c, d \dots$ , обеспечивающие минимум функции.

### 3.4.2. Статистическая обработка экспериментальных данных

Случайные погрешности при механической обработке изучаются использованием теории вероятностей и математической статистики.

Случайные погрешности подчиняются определенным законам. Законы распределения этих погрешностей известны и широко используются. К наиболее широко применяемым законам распределения случайных погрешностей относятся: закон Гуса (закон нормального распределения); закон треугольника (закон Симпсона); закон эксцентрикитета; закон равной вероятности; закон равномерного роста; [28]. Во время обработки, в том числе абразивной (шлифование, доводка, полирование, галтовка) имеет место закон нормального распределения (закон Гаусса).

Поэтому статистическая обработка результатов эксперимента была выполнена исходя из предположения действия закона нормального распределения. Статистическая обработка результатов эксперимента также

проводится исходя из предположения нормального распределения случайной величины.

Когда отклонения значений исследуемого параметра на заданном уровне значимости обусловлены действием случайных факторов, а полученная аналитическая зависимость достаточно точно описывает исследуемый параметр, в этом случае гипотеза не противоречит экспериментальным данным.

Если данное условие не выполняется, то имеется систематическая погрешность действия, которая вызвана неучтенным фактором, не входящим в рассматриваемую формулу. В таких случаях формула считается некорректной [28].

Проверку адекватности выбранной модели можно производить использованием различных критериев, таких как критерий Пирсона, критерий Холмогорова, критерий Кохрена, критерий Фишера.

Для проверки адекватности модели используем критерий Фишера

$$F = \frac{S_{\text{ш}}^2}{S_y^2}, \text{ где } S_{\text{ш}}^2 - \text{дисперсия адекватности}; \quad S_y^2 - \text{дисперсия, характеризующая}$$

опыты.

Если расчетное значение критерия Фишера -  $F$  не превышает табличным, то модель считается адекватной. При решении большинства инженерных задач достаточно уровень значимости принимать равным 0,05 (5%) [28, 78, 102, 104].

### 3.4.3. Заключение к главе III

1. Разработаны методики проведения измерения размеров деталей; определения производительности обработки; проведения многофакторных экспериментов.

2. Приведены характеристики оборудования, используемые при экспериментальных исследованиях, в том числе станок для центробежной абразивной обработки с направляющими пластинами; галтовочные барабаны; станок для центробежно-планетарной обработки; проектор оптического профиля 400Н 1(Optomech Profile Projector Model 400Н);  $\text{дм}^3$ ; весы электронные; микрометры 0-25мм и 25-50мм с ценой деления 0,01мм.

3. В качестве заготовок для обработки использовались предварительно изготовленные кубики из офиокальцита и лазурита размерами 18-25мм и 40-50мм.

4. Разработана методика устранения неравномерности изнашивания инструмента применением новой схемы обработки за счет обеспечения одинакового пути трения заготовки по поверхности инструмента.

5. Основные факторы влияют на производительность и качество обработки, и представлена методика проведения многофакторных инструментов.

6. Предложена новая конструкция станка (патент № ТJ 1199 и разработана методика проведения эксперимента на данном станке.

7. Установлено, что за счет изменения угла наклона направляющих пластин можно регулировать процесс изнашивания инструмента, и разработана методика обеспечения равномерности его изнашивания.

## **ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ НА СТАНКЕ С НАПРАВЛЯЮЩИМИ ПЛАСТИНАМИ**

### **4.1. Проведение экспериментов и анализ результатов обработки**

#### **4.1.1. Влияние продолжительности обработки на величину съема**

Преимуществом обработки на центробежном станке с направляющими пластинами является то, что при этом обеспечивается равномерное изнашивание инструмента. Равномерность износа инструмента повышает период ее эксплуатации и улучшает качество обработки [66].

Продолжительность обработки не входит в число параметров режима резания. Однако влияние режимов резания на параметры процесса напрямую зависит от продолжительности обработки. К режимам резания в данном процессе можно отнести следующие: линейную скорость инструмента, зернистость абразива, угол наклона направляющих пластин, определяющих величину поперечной подачи заготовок в процессе обработки.

Экспериментальные исследования проведены при следующих значениях факторов: продолжительности обработки 10-120 минут, линейные скорости инструмента 5,10,15 с/сек. Производилась обработка ониксита и лазурита в сухой и в жидкой среде при различных скоростях резания. В рассматриваемых интервалах зависимость величины съема от продолжительности обработки возрастает линейно. Применяя метод наименьших квадратов, результаты экспериментального исследования запишем в аналитическом виде. Зависимости величины съема от продолжительности обработки приведены в формулах 4.1-4.12). Результаты исследования показаны в виде графиков. Зависимости производительности процесса от продолжительности обработки при сухой обработке ониксита показаны на рисунках 4.1-4.3. На рисунках 4.4-4.6. приведены зависимости производительности от продолжительности обработки ониксита при обработке в жидкой среде. Как следует из графика, в рассматриваемых интервалах производительность процесса прямо пропорциональна продолжительности обработки и выражается следующими зависимостями:

$$Q_{1c} = f(t) = 2,5 + 0,24t, \text{ при } V=5 \text{ м/сек; (4.1)}$$

$$Q_{2c} = -2,1 + 0,367t, \text{ при } V=10 \text{ м/сек; (4.2)}$$

$$Q_{3c} = 0,8 + 0,318t, \text{ при } V=15 \text{ м/сек; (4.3)}$$

$$Q_{1ж} = f(t) = 0,9 + 0,32t, \text{ при } V=5 \text{ м/сек; (4.4)}$$

$$Q_{2ж} = 7,2 + 0,32t, \text{ при } V=10 \text{ м/сек; (4.5)}$$

$$Q_{2ж} = 11,6 + 0,386t, \text{ при } V=15 \text{ м/сек; (4.6)}$$

Исследование зависимости производительности от продолжительности обработки лазурита в сухой (4.7-4.9) и в жидкой среде (4.10-4.12) в рассматриваемых диапазонах выражается следующими зависимостями (4.7-4.12):

$$Q_{1c} = f(t) = 1,1 + 0,2t, \text{ при } V=5 \text{ м/сек; (4.7)}$$

$$Q_{2c} = -0,5 + 0,273t, \text{ при } V=10 \text{ м/сек; (4.8)}$$

$$Q_{3c} = -3,4 + 0,372t, \text{ при } V=15 \text{ м/сек; (4.9)}$$

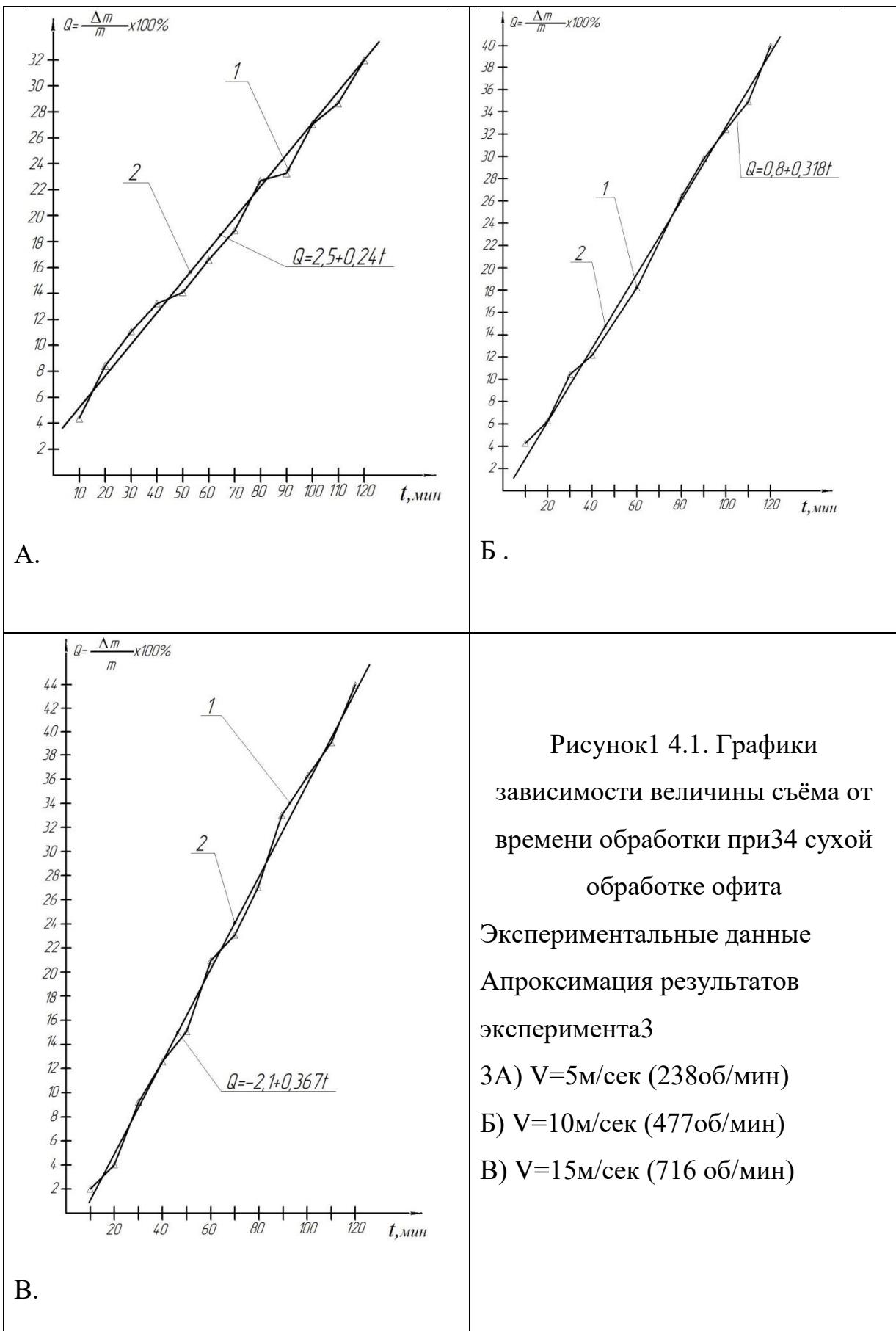
$$Q_{1ж} = f(t) = 0,2 + 0,28t, \text{ при } V=5 \text{ м/сек; (4.10)}$$

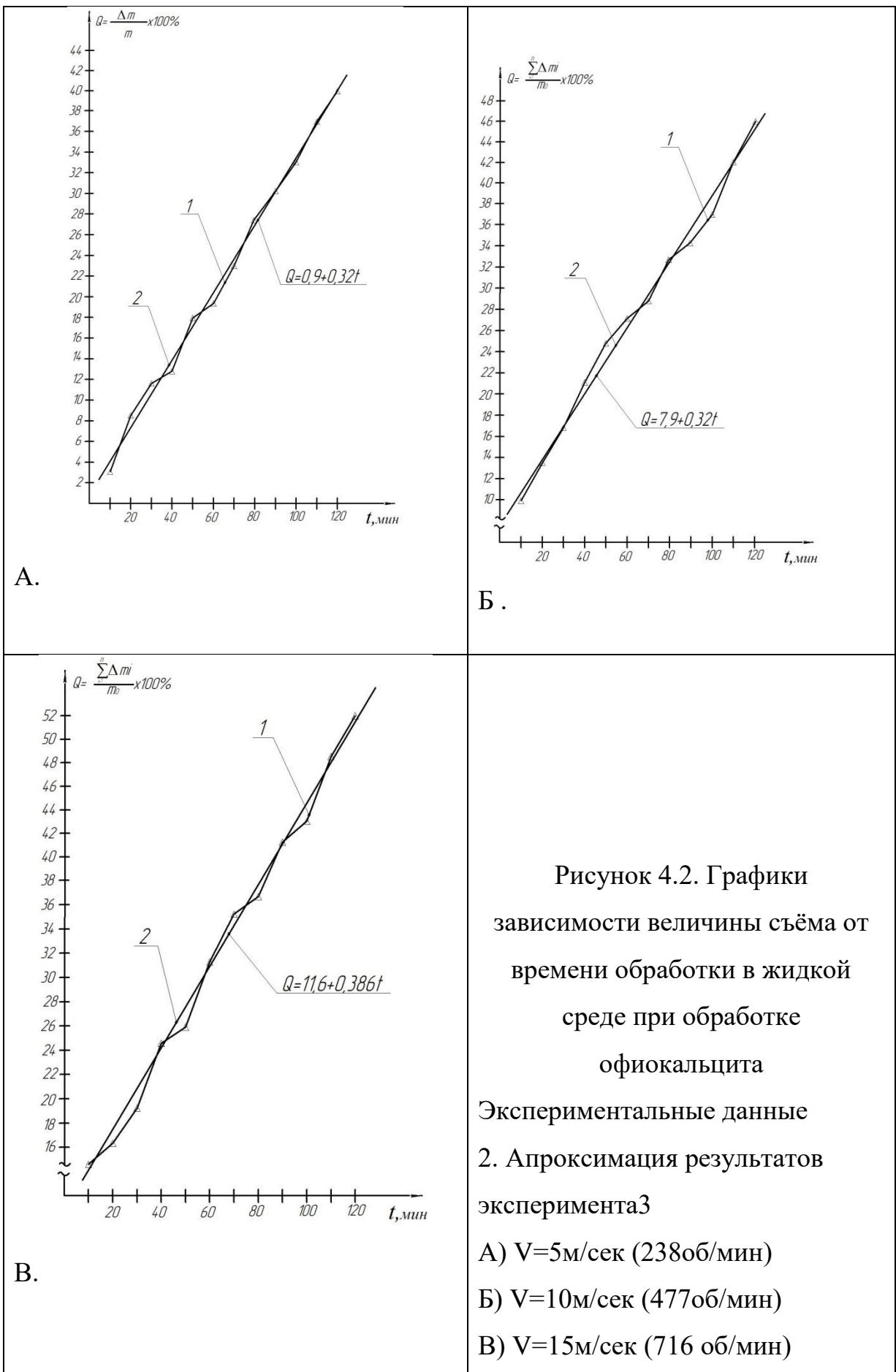
$$Q_{2ж} = 6,2 + 0,3t, \text{ при } V=10 \text{ м/сек; (4.11)}$$

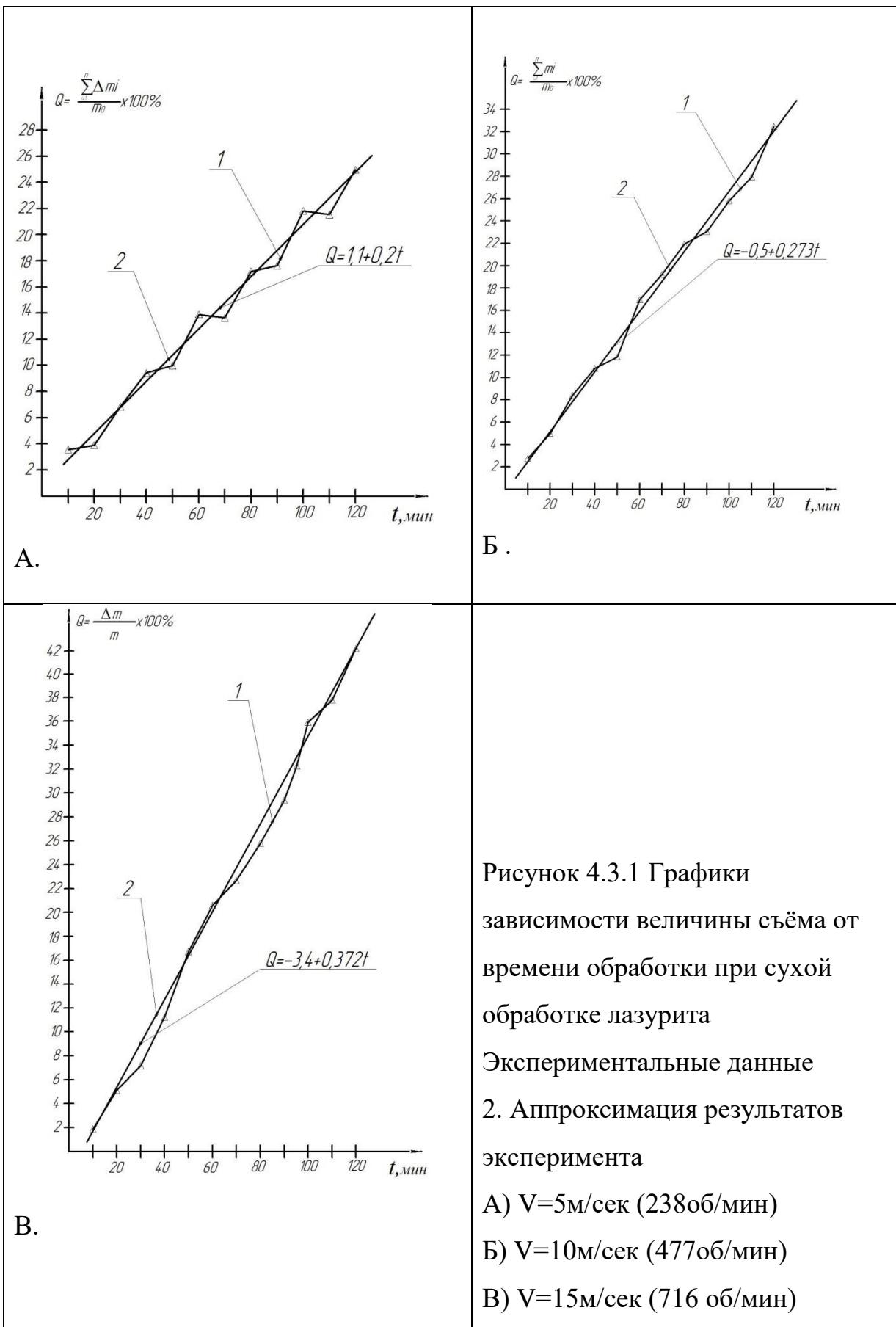
$$Q_{3ж} = 5,9 + 0,338t, \text{ при } V=15 \text{ м/сек; (4.12)}$$

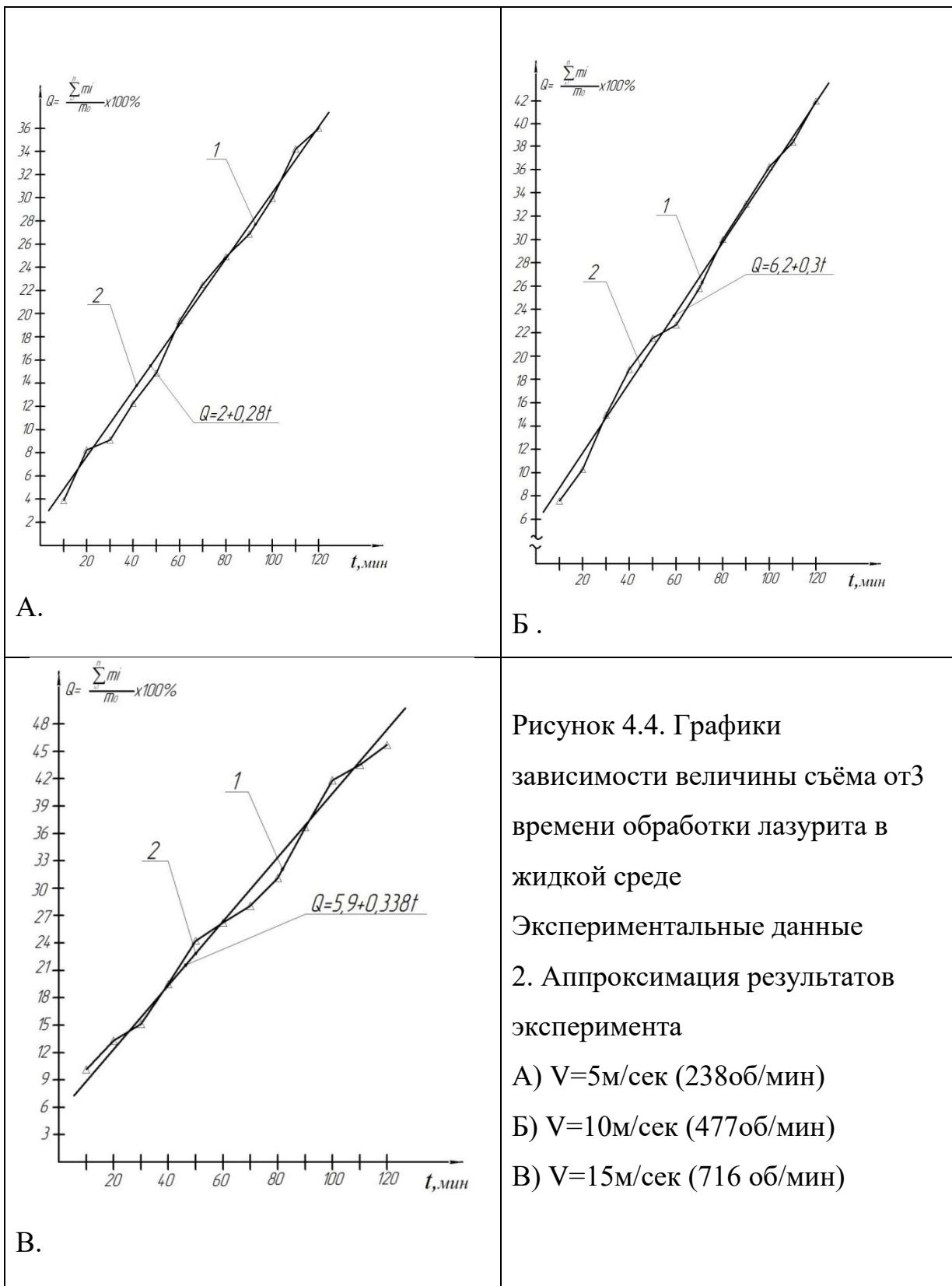
Как следует из результатов опытов (формулы 4.1-4.12), в рассматриваемых интервалах зависимость величины съема от продолжительности обработки соответствует линейной функции. Производительность процесса при обработке в жидкой среде (формулы 4.4-4.6 и 4.10-4.12) выше, чем в сухой среде (уравнения 4.1-4.3 и 4.7-4.9). Производительность процесса в данных диапазонах при обработке в жидкой среде на 24% выше, чем при сухой обработке.

Результаты экспериментов приведены на рисунках 4.1-4.4. На рисунках 4.1 и 4.2 показаны графики зависимости величины съема от продолжительности обработки оникса в сухой и в жидкой средах при различных скоростях резания. Как следует из графика, в данных диапазонах факторов зависимость производительности от времени обработки соответствует линейной функции. На рисунках 4.3 и 4.4. приведены графики зависимости величины съема от времени при сухой и жидкостной обработке лазурита при различных скоростях резания. Основные факторы, влияющие на производительность и качество поверхности при обработке, следующие: скорость взаимодействия абразивных зерен с заготовками, сила прижима в зоне контакта заготовки инструмента, режимы обработки, физико-химические свойства обрабатываемого материала, зернистость абразива, материал абразива и связки абразивного инструмента, размеры и формы инструмента, смазочно-охлаждающая жидкость. [28].









Из графиков следует, что в рассматриваемых интервалах варьирования факторов величина съема прямо пропорциональна продолжительности обработки.

#### 4.1.2. Влияние линейной скорости инструмента на производительность обработки

Инструмент в виде абразивного круга вращается и взаимодействует с заготовками. Обработка поверхности заготовок осуществляется абразивными зернами. Отдельные зерна снимают мельчайшие стружки, но за счет большого количества режущих зерен суммарный съем значительный. Исследование влияния линейной скорости инструмента на производительность обработки приведено на рисунке 4.5.

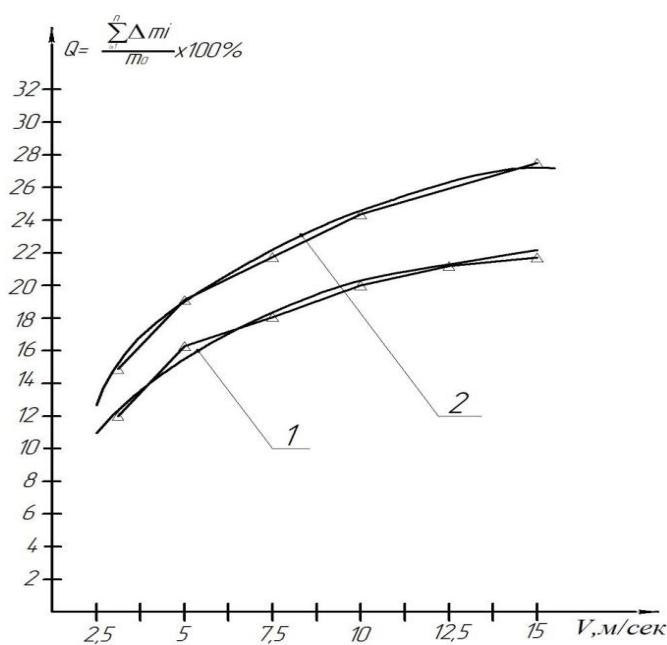


Рис.4.5. График зависимости производительности от линейной скорости инструмента при обработке офиокальцита. 1.При сухой обработке. 2.При обработке в жидкой среде.

На производительность и качество обработки наибольшее влияние оказывают следующие факторы: твердость материала заготовки, форма абразивных зерен и их зернистость, скорость взаимодействия абразивных зерен с заготовками, сила прижима в зоне контакта заготовки инструмента, наличие смазочно-охлаждающей жидкости, режим обработки. Исследование влияния линейной скорости инструмента на производительность обработки показано на рисунке 4.5. Как следует из рисунка, с увеличением скорости с 5 м/сек до 15 м/сек

величина съема возрастает примерно на 10% при обработке ониксита и на 6% при обработке лазурита.

#### **4.1.3. Влияние зернистости абразива на производительность обработки**

Один из параметров абразивных инструментов, непосредственно влияющий на качество обработанной поверхности и производительность обработки, это зернистость абразивного или алмазного круга.

Под зернистостью понимают размер кристалла абразивного вещества в микронах. В качестве абразивного материала, обладающего высокой твердостью, это электрокорунд, карбид кремния, алмаз и другие материалы. Механическое воздействие этих частиц на обрабатываемую поверхность позволяет изменять шероховатость поверхности удалять поверхностный слой.

Шлифовальные круги широко применяются как для ручной обработки поверхности, так и для работы на станках и специальных шлифовальных приспособлениях. Они относятся к режущим абразивным инструментам. Резание производится абразивными зернами при вращении круга с большой линейной скоростью. Шлифовальные круги отличаются по конструкции, геометрической форме, размерам, зернистости, виду абразива и т.д. Общим для абразивных инструментов, в том числе абразивных кругов любого вида является наличие абразивных материалов и связующих элементов.

Абразивные зерна изготавливаются из различных высокотвердых материалов, отличающихся по химическому составу и структуре, например: окись хрома, карбид кремния, электрокорунд, алмаз (искусственный или природный); эльбора и др.

Из характеристик кругов именно зернистость сильно влияет на их функциональное назначение. Отдельные зерна срезают тончайшие стружки с обрабатываемого материала. Поэтому качество поверхности после абразивной обработки весьма высокое. Абразивные зерна удерживаются в инструменте связкой. Связки абразивных инструментов бывают искусственные или природные. Функция связки - это прочное скрепление и удержание зерна между

собой. Количество материала, которое снимается за один проход, и соответственно производительность обработки зависят от размера зерна шлифовального круга. Принято размеры зерна круга переименовать как «зернистость». Чем больше зернистости абразивного материала, тем больше производительность, но при этом качество обработанной поверхности ухудшается.

Ниже приводится график зависимости производительности обработки от зернистости абразива при обработке самоцветных камней офиокальцита и лазурита. Как видно из графика, производительность обработки имеет нелинейный характер. При мелкой зернистости производительность невысокая. При обработке офита, когда зернистость в пределах 800-1200 мкм, достигается наибольшая производительность. При зернистости абразива больше 1200 постепенно снижается производительность обработки. При обработке лазурита наибольшая производительность наблюдается при зернистостях 660-900мкм. Дальнейшее повышение зернистости снижает производительность обработки.

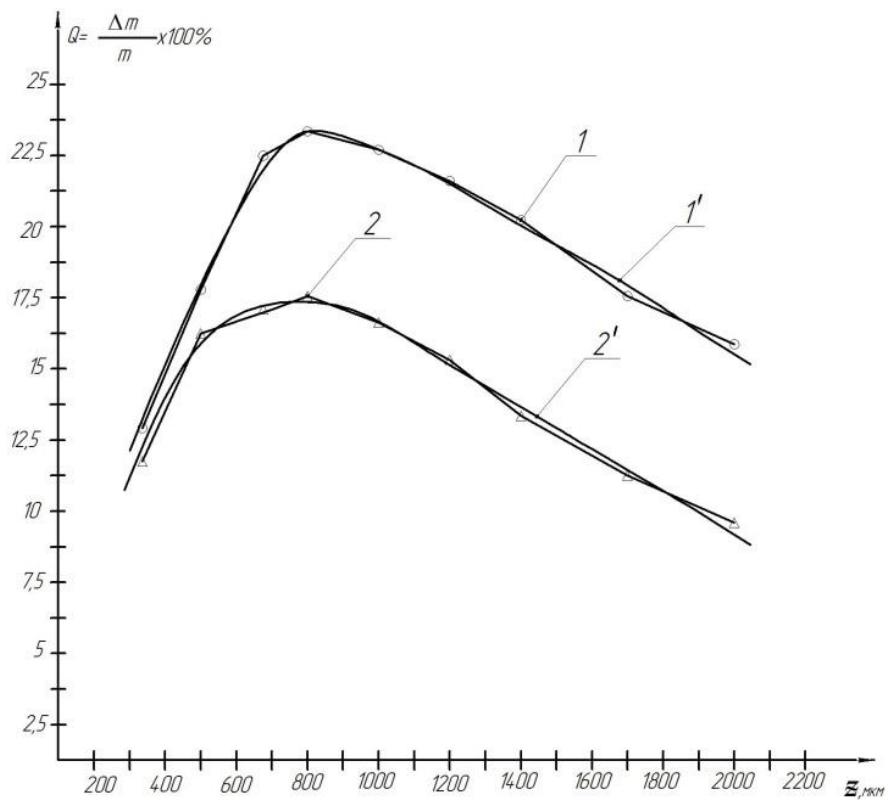


Рис. 4.6. График зависимости производительности от зернистости абразива

1. При обработке офиокальцита; 2. При обработке лазурита

#### 4.1.4. Влияние угла наклона направляющей пластины на производительность обработки

Угол наклона направляющей пластины оказывает влияние на производительность процесса обработки. Пластина, перемещающая заготовок к центру от периферии, расположена под углом  $\alpha$  к радиусу в данной точке. Силу, действующую на пластину со стороны шарика  $F_1$ , можно разложить на составляющие  $F_{1x}$  и  $F_{1y}$  (рис.). Сила  $F_{1x}$  толкает шарик от периферии к центру. Величина этой силы зависит от коэффициента трения шарика по абразивному кругу и величины угла  $\alpha$ . Если  $\alpha=0$  сила перпендикулярна пластине и шарик не передвигается по пластине. В этом случае  $F_1=F_{\text{тр.ш.}}$  и направлено противоположно ему.

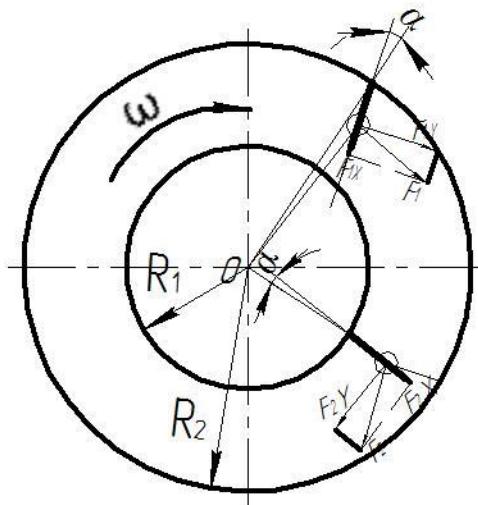


Рис.4.7. Угол наклона направляющей пластины относительно радиуса инструмента

Экспериментальные исследования показали, что с возрастанием угла наклона пластины происходит незначительное снижение производительности.

Под действием этих сил происходит вращение шарика вокруг своей оси. Сила трения шарика по пластине  $F_{\text{тр.пл.}}$  препятствует вращению шарика. По этой причине происходит скольжение шарика по поверхности круга. Величина силы трения  $F_{\text{тр.ш.}}$  зависит от коэффициента трения материала пластины. Чем больше

сила трения  $F_{\text{тр.пл.}}$ , тем больше производительность обработки. Для увеличения коэффициента трения к поверхности пластины приклеиваем резины.

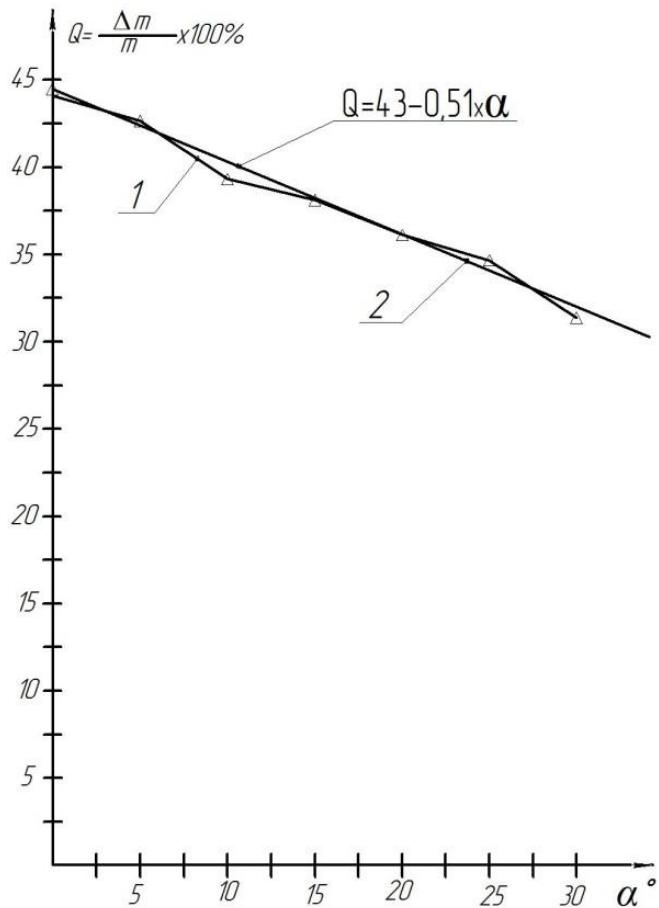


Рис.4.8. График зависимости производительности от угла наклона направляющей пластины

1. Экспериментальные данные
2. Аппроксимация результатов эксперимента

#### 4.1.5. Влияние угла наклона направляющей пластины на равномерность изнашивания инструмента при обработке

Угол наклона направляющей пластины оказывает влияние на время задержки заготовок на определенных участках инструмента при обработке.

Пластина, перемещающая заготовок к центру от периферии, расположена под углом  $\alpha$  к радиусу в данной точке. Силу, действующую на пластину со стороны шарика  $F_1$ , можно разложить на составляющие  $F_{1x}$  и  $F_{1y}$  (рис.4.7). Сила  $F_{1x}$

толкает шарик от периферии к центру. Величина этой силы зависит от коэффициента трения шарика по абразивному кругу и величины угла  $\alpha$ . Если  $\alpha=0$  сила перпендикулярна пластине, то шарик не передвигается по пластине. В этом случае  $F_1=F_{\text{тр.ш.}}$  и направлено противоположно ему.

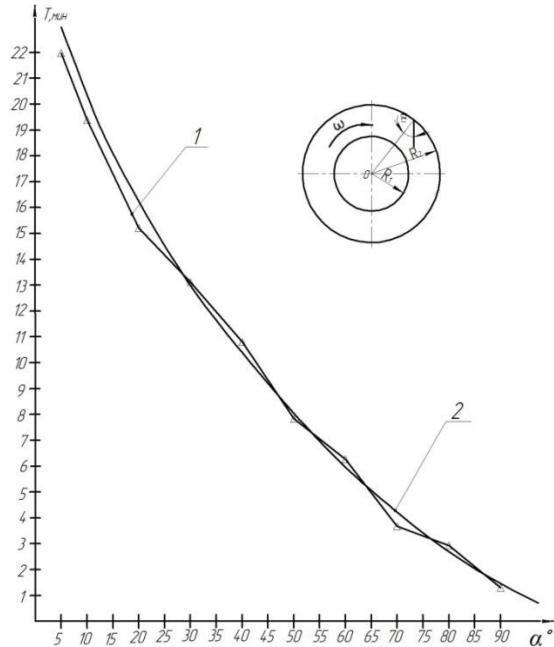


Рисунок 4.9. График зависимости времени одного круга заготовки от угла наклона пластины, направляющей их к периферии

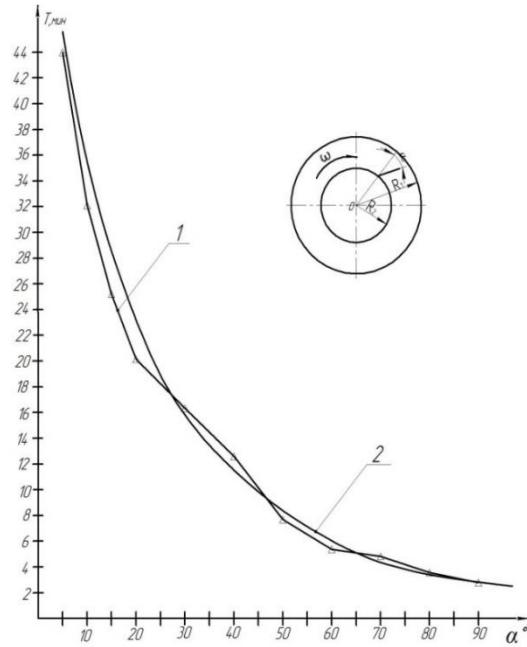


Рисунок 4.10. График зависимости времени одного круга заготовки от угла наклона пластины, направляющей их к центру

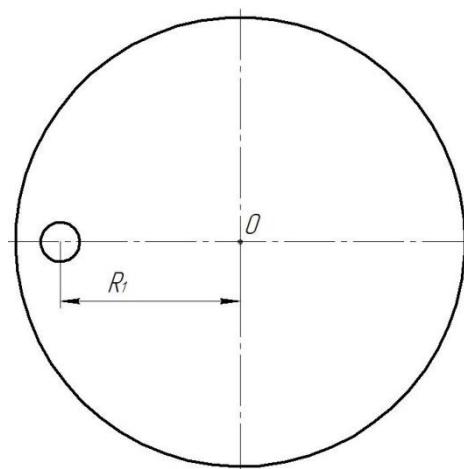


Рис.4.11. Условия равномерного изнашивания инструмента

$$A_{tp} = F_{tp} \times \omega_{kp} \times t_i \times k \quad (4.13)$$

$$\frac{A_{tp1}}{A_{tp2}} = \frac{R_{i1}}{R_{i2}} = \frac{t_{i2}}{t_{i1}} \quad (4.14)$$

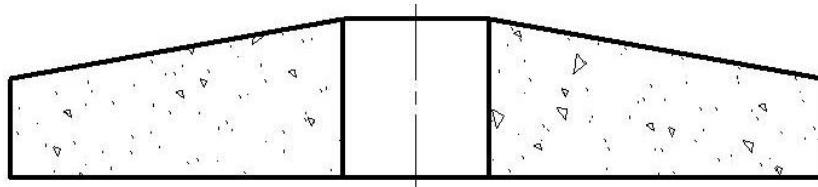


Рис.4.12. Изнашивание инструмента при обработке мелких заготовок и  
отсутствие направляющих пластин

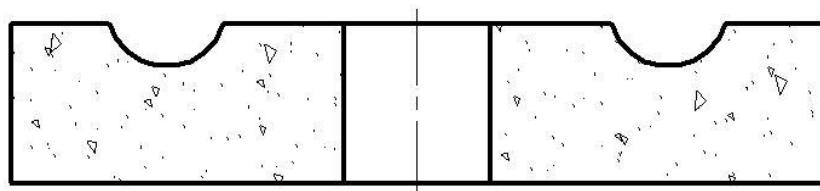


Рис.4.13. Изнашивание инструмента при обработке крупных заготовок (шаров)  
и отсутствие направляющих пластин

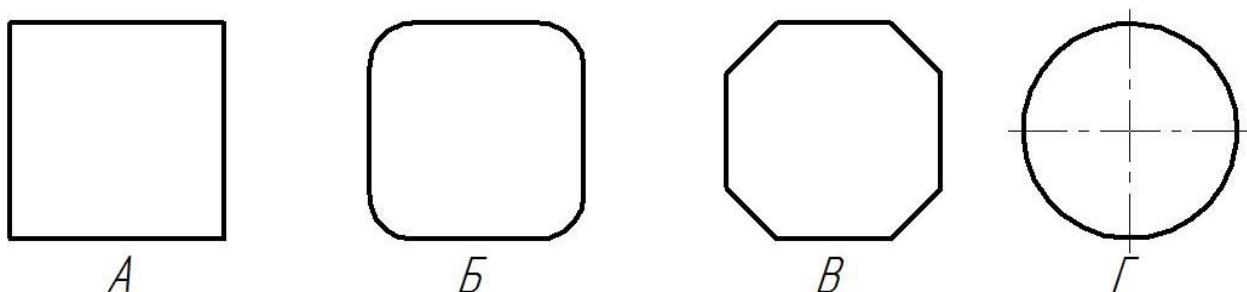


Рис. 4.14. Формообразование шариков из самоцветных камней при  
обработке на станках

Под действием этих сил происходит вращение шарика вокруг своей оси (рис.2). Сила трения шарика по пластине  $F_{tp.pl}$ . препятствует вращению шарика.

По этой причине происходит скольжение шарика по поверхности круга. Величина силы трения  $F_{tp.sh}$  зависит от коэффициента трения материала пластины. Чем больше сила трения  $F_{tp.pl}$ , тем больше производительность обработки. Для увеличения коэффициента трения к поверхности пластины приклеиваем резины.

## 4.2. Исследование точности формы от факторов режима обработки

### 4.2.1. Исследование зависимости исправления формы от угла наклона направляющей пластины

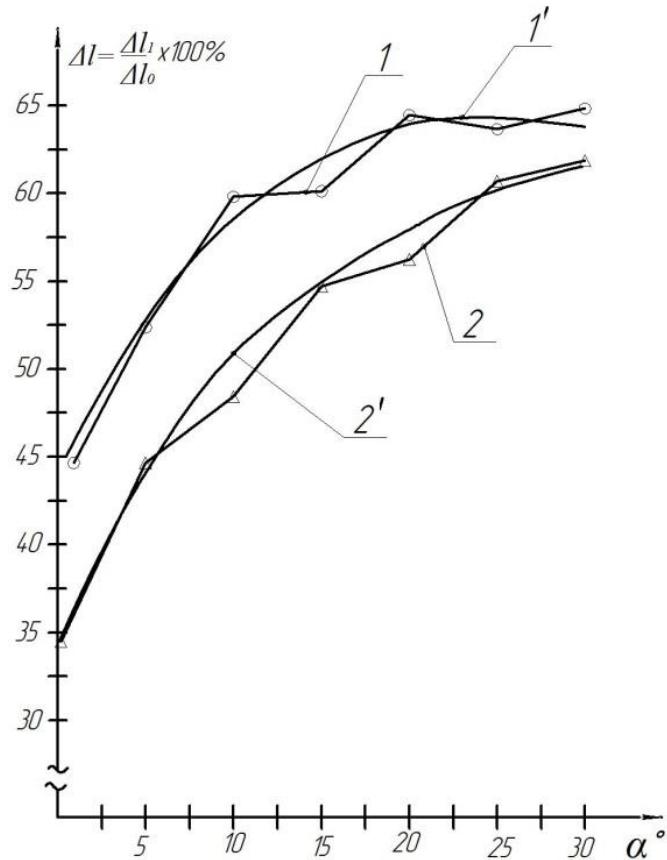


Рисунок 4.15. График исправления формы заготовок из лазурита от угла наклона направляющей пластины. 1. При мокрой обработке. 2. При сухой обработке. 1<sup>1</sup>, 2<sup>1</sup> – Экспериментальные данные

Условия проведения эксперимента: продолжительность обработки 2 часа; линейная скорость инструмента 10м/сек.

На рисунке 4.15 приведен график исправления формы заготовок из лазурита от угла наклона направляющей пластины. По оси абсциссы показан угол наклона направляющей пластины в градусах, а по оси ординаты исправление исходной погрешности в процентах. Исправление погрешности после обработки определяется как отношение величины погрешности после обработки к исходной погрешности в процентах. Как видно из графика, с увеличением угла

наклона направляющей пластины исправление возрастает и достигает 65% при обработке в среде жидкости и 60% в сухой среде.

#### 4.2.2. Влияние продолжительности обработки на исправление формы шаровидных изделий

Один из основных факторов, влияющих на параметры процесса обработки, это продолжительность обработки. Для определения наиболее целесообразной продолжительности обработки проводим эксперимент при усредненном значении других факторов. Результаты эксперимента приведены на рисунке 1.

Как видно из эксперимента, при значении продолжительности обработки равной 120 минут исправление формы достигает максимума своего значения. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки не оказывает существенное влияние на формы исправления шаровидных заготовок.

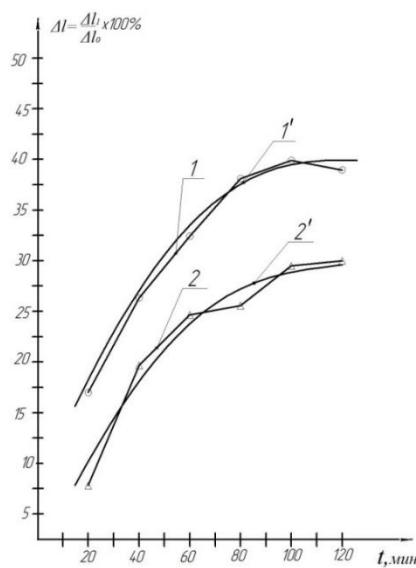


Рисунок 4.16. График зависимости исправления формы от времени обработки.

Условия обработки  $\alpha=30^\circ$ ,  $V=5$  м/сек  $z=1000$  мкм.

1. При обработке офита; 2. При обработке лазурита

Исходя из этого в дальнейшем исследовании влияния параметров режима обработки на исправление формы шаровидных заготовок продолжительность обработки принимаем равной 120 минут.

#### 4.2.3. Влияние линейной скорости инструмента на исправление формы шаровидных заготовок из офиокальцита и лазурита

Инструмент в виде абразивного круга вращается и взаимодействует с заготовками. Обработка поверхности заготовок происходит под воздействием высокоскоростного врезания абразивных зерен на материал заготовки. Отдельные зерна снимают мельчайшие стружки за короткий промежуток времени ( $10^{-4}$ – $10^{-5}$  сек). Так как количество режущих зерен большое, за счет их массового воздействия снимаются значительные припуски.

На величину съема и исправление формы при обработке больше всего влияют следующие факторы: линейная скорость инструмента, зернистость абразива, формы абразивных зерен, скорость взаимодействия абразивных зерен с заготовками, угол наклона направляющих пластин. Исследование влияния линейной скорости инструмента на исправление формы шаровидных заготовок приведено на рисунке 4.6.

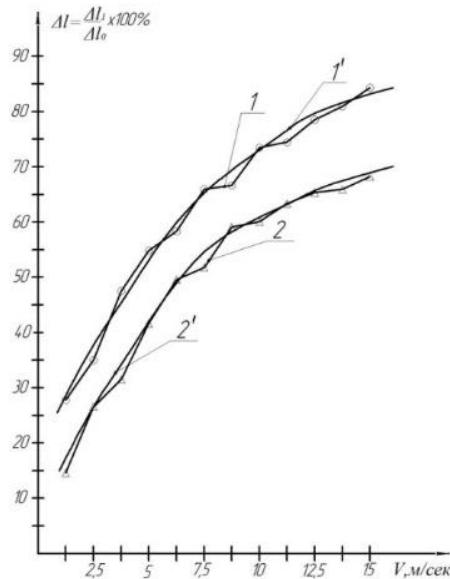


Рис.4.17. График зависимости исправления формы от линейной скорости инструмента. Условия обработки  $\alpha = 30^\circ$ ,  $V = 15 \text{ м/сек}$ ,  $z = 1000 \text{ мкм}$ ; 1. При обработке офита; 2. При обработке лазурита

График зависимости исправления формы заготовок из офиокальцита и лазурита от продолжительности обработки приведен на рисунке 4.16. Как видно

из графика, зависимость нелинейна и достигает максимума при продолжительности обработки 120 минут.

На графике (рис. 4.17) показаны исправление формы и производительность обработки шаров диаметров 30-80 мм от линейной скорости инструмента при центробежной галтовке. Как видно из графика, исправление формы ворастает с увеличением линейной скорости.

### **1.2.1. Исследование зависимости шероховатости поверхности от режимов обработки**

Шероховатость поверхности обработанных образцов влияет на эксплуатационные показатели деталей машин приборов. В целом они определяют интенсивность износа деталей машин, от которого зависит надежность машин и долговечность их работы. Для изделий ювелирной промышленности также важно обеспечить параметры качества поверхности, обеспечивающие гладкость и блеск поверхности изделия. Некачественно обработанные изделия с шероховатой поверхностью не могут быть красивыми и удовлетворять потребности покупателей, и поэтому становятся неконкурентоспособными. Поэтому обеспечение требуемого качества поверхности является важнейшей задачей.

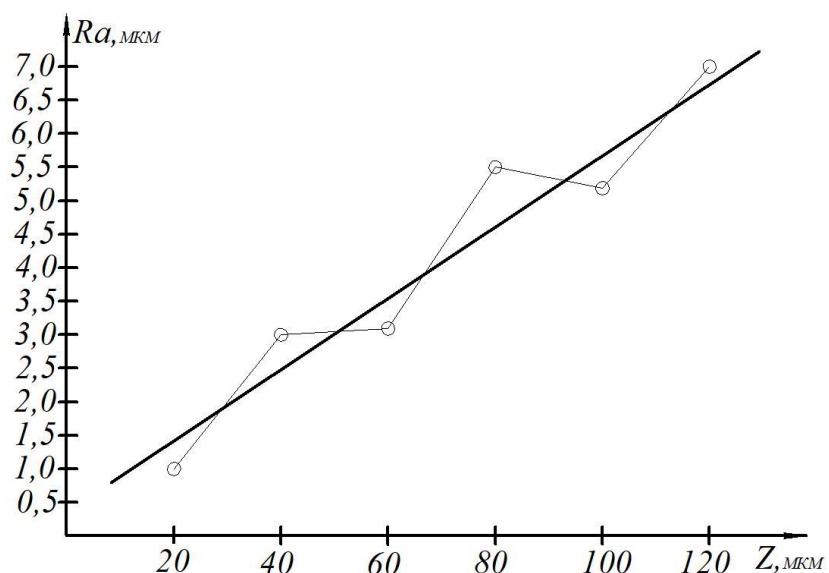


Рисунок 4.18. График зависимости шероховатости поверхности от зернистости абразива

Исследование шероховатости поверхности образцов при обработке на центробежном станке с направляющими пластинами показало, что на шероховатость поверхности наибольшее влияние оказывают зернистость абразивного инструмента и длительность обработки.

Зависимость шероховатости от зернистости абразива показана на рисунке 4.18. Как видно из рисунка, в рассматриваемых диапазонах изменения шероховатости зависимость линейна. С увеличением зернистости абразива возрастает шероховатость поверхности. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки показана на рисунке 4.19. Зависимость нелинейна. При продолжительности обработки равной 70 минут стабилизируется дальнейшее увеличение продолжительности обработки и незначительно влияет на снижение шероховатости.

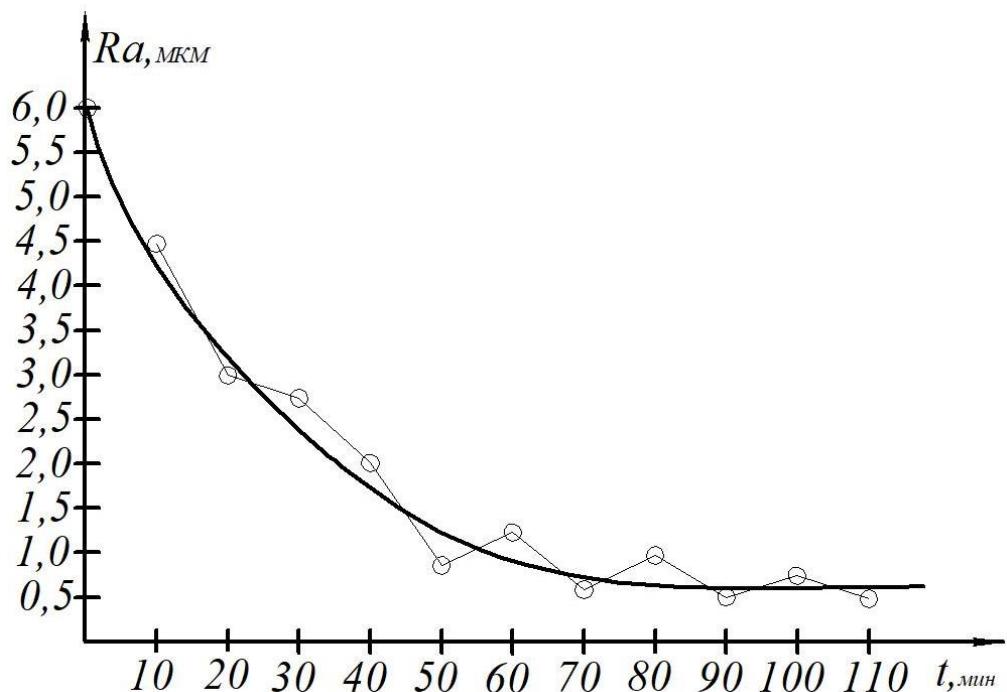


Рисунок 4.19. График зависимости шероховатости поверхности от продолжительности обработки

## **4.3. Проведение многофакторного эксперимента и обработка полученных результатов**

Традиционно используемые при формообразовании кубических заготовок методы галтовки во вращающихся барабанах с горизонтальной осью вращения мало производительны. Превращение кубических заготовок в шарообразные использованием этих методов невозможно. Эти методы можно использовать лишь для снятия углов и острых граней. Проведённые исследования позволили разработать наиболее производительный метод формообразования шариков из самоцветных камней, одновременно обеспечивающий исправление формы и превращающий их в шаровидные заготовки с относительно малыми отклонениями от сферичности.

Однофакторные эксперименты позволили ранжировать факторы по степени их влияния на производительность процесса. Такими факторами являются линейная скорость вращения инструмента, зернистость абразива и продолжительность обработки.

### **4.3.1. Многофакторное исследование процесса центробежной абразивной обработки на станке с направляющими пластинами**

Исследование процесса обработки производим методом полного факторного эксперимента (ПФЭ). При данном методе проведения эксперимента реализуются все возможные неповторяющиеся комбинации уровней факторов. При этом каждый фактор варьируется на заранее выбранном количестве уровней. Для проведения эксперимента методом полного факторного эксперимента (ПФЭ) необходимо сперва составить план проведения экспериментов. При проведении ПФЭ при числе уровней, равных 2, количество экспериментов определяется по формуле  $n = 2^k$ , где  $k$  – количество независимых переменных. Матрица плана эксперимента для двух факторов приведена в таблице 4.1.

## Матрица полного факторного эксперимента $2^2$

Таблица 4.1

Номер эксперимента	Матрица ПФЭ			$Y$
	$z_0$	$z_1$	$z_2$	
1	+1	-1	-1	$y_1$
2	+1	+1	-1	$y_2$
3	+1	-1	+1	$y_3$
4	+1	+1	+1	$y_4$

Уравнение регрессии можно представить в следующем виде;

$$\tilde{y} = b_0 z_0 + b_1 z_1 + b_2 z_2 ,$$

Коэффициенты математической модели определяются по формуле

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} y_j \quad (4.16)$$

, где  $i = 1, \dots, k$ .

Для проверки адекватности модели необходимо рассчитать дисперсии эксперимента. Адекватность по критерию Фишера вычисляется по формулам (4.17) – (4.19).

Проверка адекватности осуществляется путем сопоставления расчетного значения критерия Фишера с критическим. Для этого, прежде всего, определяется дисперсия адекватности.

Дисперсия адекватности определяется по формуле 4.17

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{n - k} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - y_j)^2 \quad (4.17)$$

Где  $\tilde{y}_j$  – расчетное значение отклика  $y$ ;

$y_j$  – наблюдаемое в ходе эксперимента значение отклика;

$k$  – количество коэффициентов, включенных в уравнение регрессии, соответствует числу степеней свободы.

Далее по формуле 4.18 определяем дисперсии эксперимента

$$S_y^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2 \quad (4.18)$$

Где  $\bar{y}$  – оценка математического ожидания наблюдений  $y$ .

Адекватность модели определяется по формуле 4.19 как отношение дисперсии адекватности к дисперсии эксперимента

$$F_{\text{наб}} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad (4.19)$$

Проведенные однофакторные экспериментальные исследования процесса обработки позволили выявить следующие независимые факторы, наиболее сильно влияющие на процесс обработки. К данным факторам относятся линейная скорость инструмента и продолжительность обработки.

Для экспериментального исследования процесса использовались заготовки кубической формы из офиокальцита. Размеры граней кубических заготовок в пределах от 14 до 20мм.

Уравнение математической модели имеет вид:  $Y_0 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{1,2} x_1 x_2$ , где  $x_1$  – кодированное значение времени обработки;  $x_2$  – кодированное значение линейной скорости инструмента. Связь между кодированным и натуральным значениями факторов следующая:

$$x_1 = \frac{\tilde{x}_1 - 70}{50}, \quad x_2 = \frac{\tilde{x}_2 - 10}{5}$$

При обработке офиокальцита всухую

Таблица 1

№	X <sub>o</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Q
1	+	-	-	+	6
2	+	+	-	-	32
3	+	-	+	-	7
4	+	+	+	+	44

Обработка офиокальцита в водной среде

Таблица 2

№	X <sub>o</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Q
1	+	-	-	+	7
2	+	+	-	-	41
3	+	-	+	-	16
4	+	+	+	+	52

При обработке лазурита всухую

Таблица 3

№	X <sub>o</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Q
1	+	-	-	+	4
2	+	+	-	-	25
3	+	-	+	-	5,5
4	+	+	+	+	42

Обработка лазурита в водной среде

Таблица 4

№	X <sub>o</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Q
1	+	-	-	+	6
2	+	+	-	-	36
3	+	-	+	-	10
4	+	+	+	+	46

Уравнение регрессии для двух факторов имеет следующий вид

$$Y_o = b_o + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{1,2} X_1 X_2$$

Используя формулу 4.16, определяем значения коэффициентов математической модели при обработке лазурита всухую:

$$B_0 = \frac{6+32+7+44}{4} = \frac{89}{4} = 22,25;$$

$$B_1 = \frac{-6+32-7+44}{4} = \frac{63}{4} = 15,75;$$

$$B_2 = \frac{-6-32+7++44}{4} = \frac{13}{4} = 3,25;$$

$$B_{1,2} = \frac{6-32-7+44}{4} = \frac{11}{4} = 2,75;$$

Подставляя значение коэффициентов в уравнение регрессии, получим уравнение зависимости производительности от факторов в натуральных единицах.

Для обработки ониксита всухую, уравнение 1;

$$Q=22,25 + 15,75\left(\frac{t-70}{50}\right) + 3,25\left(\frac{V-10}{5}\right) + 2,75\left(\frac{t-70}{50}\right)\left(\frac{V-10}{5}\right) \quad (4.16)$$

аналогично для обработки ониксита в водной среде уравнение 2;

$$Q=29 + 17,5\left(\frac{t-70}{50}\right) + 5\left(\frac{V-10}{5}\right) + 0,5\left(\frac{t-70}{50}\right)\left(\frac{V-10}{5}\right) \quad (4.17)$$

лазурита при обработке всухую, уравнение 3;

$$Q=19,125 + 14,375\left(\frac{t-70}{50}\right) + 4,625\left(\frac{V-10}{5}\right) + 3,875\left(\frac{t-70}{50}\right)\left(\frac{V-10}{5}\right) \quad (4.18)$$

и лазурита в водной среде, уравнение 4.

$$Q=24,5 + 16,5\left(\frac{t-70}{50}\right) + 3,5\left(\frac{V-10}{5}\right) + 1,5\left(\frac{t-70}{50}\right)\left(\frac{V-10}{5}\right) \quad (4.19)$$

#### **4.4. Заключение к главе IV**

1. Спроектировано и изготовлено новое устройство для центробежной абразивной обработки шариков (малый патент ТJ №1199 МПК B24B 31/108; B24B 11/00. Опубл. 08.07.2021. Бюл177, 2021.), проведены экспериментальные

исследования обработки на данном оборудовании, установлены основные закономерности процесса обработки.

2. Определены основные факторы, влияющие на точность и производительность процесса обработки обрабатываемых изделий.

3. Получены эмпирические зависимости, устанавливающие влияние технологических факторов, таких как линейная скорость инструмента, зернистость абразива, продолжительность обработки, угол наклона направляющей пластины с параметрами производительности и исправление формы при обработке.

4. Установлено, что величина съема в процентах от исходной массы возрастает по мере возрастания продолжительности обработки 1 и линейной скорости инструмента.

5. Обработка на станке с направляющими пластинами (патент № ТJ 1199) показала, что исправление формы достигает до 90% от исходного значения. Данный метод обеспечивает сравнительно низкие значения отклонения формы и их можно использовать при финишных операциях обработки.

6. Угол наклона направляющей пластины оказывает влияние на время задержки заготовок на определенных участках инструмента и тем самым оказывает влияние на интенсивность его износа. За счет изменения углов пластин, направляющих заготовки от периферии круга к центру и от центра к периферии, можно обеспечить равномерность износа инструмента.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ**

1. Существующие способы обработки самоцветных камней в ювелирной промышленности малопроизводительны и не отвечают современному уровню развития промышленности.

Повышение производительности обработки позволяет значительно снизить себестоимость изделий и увеличить их выпуск.

2. Предлагаемое центробежное устройство с направляющими пластинами обеспечивает трехосное вращение шаровидных заготовок при их обработке, что создает условия для исправления их геометрической формы, также за счет изменения угла наклона направляющей пластины регулировать изнашивание инструмента и создавать условие для его равномерного изнашивания.

3. Проведены исследования процесса шлифования шариков и рассмотрены различные схемы обработки, в том числе обработка шариков в галтовочных барабанах с горизонтальной и наклонной осью вращения; планетарно-центробежная обработка; обработка с использованием двухдискового шлифовального станка; формообразование шаровидных изделий в специальном станке между отрезками труб; роторно-центробежная обработка; формообразование шариков на станке с направляющими пластинами (патент № TJ (1199)).

4. Предложенное устройство (патент № TJ (1199)) позволяет существенно повысить качество и производительность обработки заготовок из самоцветных камней, также существенно повышается срок службы шлифовального инструмента за счет равномерного его изнашивания по всей рабочей поверхности.

5. При центробежной обработке на станках с вращающимся дном наблюдается неравномерный износ инструмента, снижающий эффективность обработки.

На основе анализа существующих методов предложен способ центробежной обработки, при котором заготовки при помощи направляющих пластинок

направляются от периферии к центру и от центра к периферии. (Патент № ТJ 1199), что устраняет неравномерность износа инструмента при обработке.

6. Разработаны методики: проведения измерения размеров деталей; определения производительности обработки; проведения многофакторных экспериментов; методика устранения неравномерности изнашивания инструмента применением новой схемы обработки за счет обеспечения одинакового пути трения заготовки по поверхности инструмента.

7. Приведены характеристики оборудования, используемые при экспериментальных исследованиях, в том числе станок для центробежной абразивной обработки с направляющими пластинами; галтовочные барабаны; станок для центробежно-планетарной обработки; проектор оптического профиля 400Н (Optomech Profile Projector Model 400Н); дм<sup>3</sup>; весы электронные; микрометры 0-25мм и 25-50мм с ценою деления 0,01мм. В качестве заготовок для обработки использовались предварительно изготовленные кубики из офиокальцита и лазурита размерами 18-25мм и 40-50мм.

9. Предложена новая конструкция станка (патент № ТJ 1199 и разработана методика проведения эксперимента на данном станке.

10. Установлено, что за счет изменения угла наклона направляющих пластин можно регулировать процесс изнашивания инструмента и разработана методика обеспечения равномерности его изнашивания.

11. Работанная технология формирования шариков на станке с направляющими пластинами внедрена в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства ООО “РУХОМ” при изготовлении шаровидных изделий из самоцветных камней.

12. Результаты исследования можно применять на машиностроительных, приборостроительных, ювелирных предприятиях при обработке изделий тел вращения, в частности изготовления шаровидных изделий из высокотвердых и хрупких материалов.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ**

1. Существующие способы обработки самоцветных камней в ювелирной промышленности малопроизводительны и не отвечают современному уровню развития промышленности.

Повышение производительности обработки позволяет значительно снизить себестоимость изделий и увеличить их выпуск.

2. Предлагаемое центробежное устройство с направляющими пластинами обеспечивает трехосное вращение шаровидных заготовок при их обработке, что создает условия для исправления их геометрической формы, также за счет изменения угла наклона направляющей пластины регулировать изнашивание инструмента и создавать условие для его равномерного изнашивания.

3. Проведены исследования процесса шлифования шариков и рассмотрены различные схемы обработки, в том числе обработка шариков в галтовочных барабанах с горизонтальной и наклонной осью вращения; планетарно-центробежная обработка; обработка с использованием двухдискового шлифовального станка; формообразование шаровидных изделий в специальном станке между отрезками труб; роторно-центробежная обработка; формообразование шариков на станке с направляющими пластинами (патент № ТJ (1199)).

4. Предложенное устройство (патент № ТJ (1199)) позволяет существенно повысить качество и производительность обработки заготовок из самоцветных камней, также существенно повышается срок службы шлифовального инструмента за счет равномерного его изнашивания по всей рабочей поверхности.

5. При центробежной обработке на станках с вращающимся дном наблюдается неравномерный износ инструмента, снижающий эффективность обработки.

На основе анализа существующих методов предложен способ центробежной обработки, при котором заготовки при помощи направляющих

пластиноч направляются от периферии к центру и от центра к периферии. (Патент № ТJ 1199), что устраняет неравномерность износа инструмента при обработке.

6. Разработаны методики: проведения измерения размеров деталей; определения производительности обработки; проведения многофакторных экспериментов; методика устранения неравномерности изнашивания инструмента применением новой схемы обработки за счет обеспечения одинакового пути трения заготовки по поверхности инструмента.

7. Приведены характеристики оборудования, используемые при экспериментальных исследованиях, в том числе станок для центробежной абразивной обработки с направляющими пластинами; галтовочные барабаны; станок для центробежно-планетарной обработки; проектор оптического профиля 400Н (Optomech Profile Projector Model 400Н); дм<sup>3</sup>; весы электронные; микрометры 0-25мм и 25-50мм с ценой деления 0,01мм. В качестве заготовок для обработки использовались предварительно изготовленные кубики из офиокальцита и лазурита размерами 18-25мм и 40-50мм.

9. Предложена новая конструкция станка (патент № ТJ 1199 и разработана методика проведения эксперимента на данном станке.

10. Установлено, что за счет изменения угла наклона направляющих пластин можно регулировать процесс изнашивания инструмента и разработана методика обеспечения равномерности его изнашивания.

11. Разработанная технология формирования шариков на станке с направляющими пластинами внедрена в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства ООО “РУХОМ” при изготовлении шаровидных изделий из самоцветных камней.

12. Результаты исследования можно применять на машиностроительных, приборостроительных, ювелирных предприятиях при обработке изделий тел вращения, в частности изготовления шаровидных изделий из высокотвердых и хрупких материалов.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Крагельский И.В. Трение и износ. -М.:Машиностроение, 1968.-480с.
- 2.Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. -М.:Машиностроение, 1974.-320с.
- 3.Ящерицын П.И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей. -Мн.:Наука и техника, 1966.- 384с.
- 4.Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. - М.:Машиностроение, 1972.-272с.
- 5.Кулаков Ю.М. Отделочно-зачистная обработка деталей/Ю.М.Кулаков, В.А. Хрульков.-М.:Машиностроение, 1979.-216с.
- 6.Носач М.Я. Прогрессивные процессы абразивной обработки в машиностроении.-М.-Л. Машиностроение, 1966.- 100с.
- 7.Коршунов В.А. Кинематический расчет параметров галтовочного устройства с пространственным движением барабана //Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин и приборов: Доклады зональной конф. -Пенза: ПДНТП, 1986.- С.31-32.
- 8.Артемов В.Н. Особенности расчета галтовочных барабанов/ В.Н.Артемов, В.Ф. Першин, А.Г.Ткачев// Современные технологии в машиностроении: Материалы научно-техн. конф. - Пенза: ПДНТП, 1996.-С.53-66.
- 9.Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. - М.: Машиностроение, 1974. - 136 с.
- 10.Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии: 4 1 , - Ростов- на-Дону: ДГТУ, Ч 1. 1993. - 88 с.
- 11.Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии: 4 2 , - Ростов- на-Дону: ДГТУ, 1994. - 89 с.
- 12.Бабичев А.П. Состояние и перспективы развития отделочно-зачистной обработки деталей машин // Интенсификация и автоматизация отделочно-

зачистной обработки деталей машин и приборов: Тез. докл. на- учн.-техн. конф. - Ростов на Дону, 1988. - С. 3-5.

13.Балицкий В.В. Совершенствование технологии объемной вибрационной обработки незакрепленных деталей в прямолинейных рабочих камерах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. - 16 с.)

14. Тамаркин М.А. Технологические особенности процесса центробежно-ротационной обработки/ М.А.Тамаркин, Д.В.Виноградов, Э.Э.Гищенко, Д.И.Гаврилов// Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы:

15. Ящерицын П.И. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива/ П.И. Ящерицын, А.Н.Мартынов, А.Д.Гридин. -Мн.:Наука и техника, 1978,- 224с.

16.Трилисский В.О. Объемная центробежно-ротационная обработка деталей/ В.О.Трилисский, И.Е.Бурштейн, В.И. Алферов. — М.:НИИмаш, 1983.- 52с.

17. Мартынов А.Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. —Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1981.- 218с.

18. Мартынов А.Н. Определение основных технологических параметров камерного способа абразивной обработки деталей/ А.Н.Мартынов, В.А.Лемин, В.А.Скрябин// Известия вузов: Научно-технический журнал. -М.:МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1990 №9. - С.95-100.

19. Барон Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле. - Л.;Машиностроение, 1975.- 128с.

20.Отделочно-абразивные методы обработки: Справочное пособие/Л.М.Кожуро, А.А.Панов, Э.Б. Пономарева, П.С.Чистосердов// Под общ.ред.П.С.Чистосердова. -Мн.:Вышешая школа, 1983.-287с.

21.Скворчевский Н.Я. Формирование поверхности при магнитно-абразивном полировании/ Н.Я.Скворчевский, Л.К.Минин//Совершенствование

процессов финишной обработки в машиностроении: Материалы I Всесоюзной научно-техн.конф. —М., 1975.-С.111-113.

22. Скворчевский Н.Я. Особенности применения СОЖ при магнитно-абразивном полировании/ Н.Я.Скворчевский, Ф.Ю. Сакулевич//Технология машиностроения:Сб.тр. -Тула:Тульск,политехн.ин-т, 1977.-С.128-131.

23. Ящерицын П.И. Эффективность процесса магнитно-абразивной обработки/ П.И.Ящерицын, Э.Н.Федорович, Н.Я.Скворчевский// ^ Известия АН БССР: серия физико-технических наук,1987.-№ 1.-^ С.46-51.

24. Скворчевский Н.Я. Оптимизация магнитных систем для магнитно-абразивной обработки/ Н.Я.Скворчевский, Э.Н.Федорович, Г.И.Каран// Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: Межвуз.сб.науч.тр. —Пенза: Пенз. политехи, ин-т, 1988.- С.4-8.

25. Ящерицын П.И. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива/ П.И.Ящерицын, А.Н.Мартынов, А.Д.Гридин. -Мн.:Наука и техника, 1978,- 224с.

26. Мартынов А.Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. -Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1981.- 218с.

27. Зверовщиков В.З. Центробежно-абразивная обработка поверхностей деталей — эффективная технология механизации ручных операций// Современные технологии в машиностроении: Сб.материалов научно-практ.конф. - Пенза: ПДЗ, 1999. - С.54-56.

28. Мирзоалиев А.И. Повышение эффективности процесса центробежной абразивной галтовки за счет совершенствования конструкторско-технологических решений. [Текст]: Дис....канд . технич. наук: 05.02.07/ А.И Мирзоалиев;

29. Мирзоалиев А.И., Убайдуллоев А.Н., Ходжаев Т.А., Мирзоалиев И. Повышение эффективности процесса центробежной абразивной обработки изделий из самоцветных камней: Монография. - Душанбе: Ирфон, 2020. 128 стр.

30.Патент № TJ 648 Таджикистан. МПК(2014), B24B1/00. 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

31. Патент. № TJ 647 Таджикистан. МПК(2014), B24B31/00. 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

32. Мартынов А.Н. К определению коэффициента резания-царапания при абразивном микроскоблении/ А.Н.Мартынов, В.А.Скрябин // Чистовая обработка деталей машин: Межвуз.сб. науч. тр. -Саратов: Саратовский политехнический, ин-т, 1981.- С.100-104.

33. Мартынов А.Н. Исследование характера изменения тангенциальной силы и глубины царапания в условиях абразивного микроскобления/.Н.Мартышов, В.А.Скрябин // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: Межвуз.сб.науч.тр. -Пенза: Пенз. политехи, ин-т, 1982.- Выш.11. - С.68-70.

34. Мартынов А.Н. Характер изменения тангенциальной силы и глубины царапания при абразивном микроскоблении / А.Н.Мартынов, Ю.Т.Шестопал, В.А.Скрябин // Прогрессивные методы финишной абразивной обработки деталей машин и приборов: Сб.статей. -Саратов: Саратовский гос. ун-т, 1983.- С.8-10.

35.Повидайло В.А. Исследование влияния абразивных зерен на основные показатели процесса тонкого шлифования хрупких деталей виброобъемным способом/ В.А.Повидайло, Д.В.Шмалюк// Состояние и перспективы промышленного освоения вибрационной обработки: Сб.статей. - Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1974.- С.27-31.

36. A.c.1313668 ССРР, МПК B24B 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

37. А.с.1781009.СССР, МПКВ 24 В 31/108.Способ центробежной обработки деталей и устройство для его осуществления. [Текст] / Ю.В.Кишев; Н.Н. Рябченко. Заявл.11.08.90. Опубл. 15.12.92. Бюл. №46.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. Мартынов А.Н. К вопросу о центробежно-планетарном способе обработки свободным абразивом/ А.Н.Мартынов, Г.О.Ярошевич,

47. В.З.Зверовщиков // Технология и автоматизация производственных процессов в машиностроении: Межвуз.сб.науч.тр. -Пенза: Пенз. Политехн. ин-т, 1976.—С.29-33.

48. Мартынов А.Н. Обработка поверхностей деталей центробежно-планетарным способом/ А.Н.Мартынов, В.З.Зверовщиков // Известия вузов. Машиностроение. М: МВТУ им.Баумана, 1977 - №2. - С. 128131.

49. Мартынов А.Н. Некоторые характеристики процесса финишной обработки деталей центробежно-планетарным способом/

50. А.Н.Мартынов, В.З.Зверовщиков // Абразивы: Научно-техн.реф.сб. -М.: НИИмаш, 1979.- №8. С.4-6.

51. Мартынов А.Н. Динамика движения частиц рабочей загрузки в контейнерах с планетарным вращением/ А.Н.Мартынов,

52. В.З.Зверовщиков, А.Е.Зверовщиков//Технология и автоматизация производственных процессов в машиностроении: Серия «Машиностроение»: Сб. ученых трудов ун-та. Пенза: Изд-во Пенз.гос.ун-та, 1999 -Вып.2.-С.82-86.

53.Гарбер М.И. Декоративное шлифование и полирование. - 2-е изд., -М. Машиностроение, 1964.- 180с.

54.Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник /Под общей ред.С.Г.Энелиса, ЭМ.Берлинера. - 2-е изд., перераб. и доп. -М. Машиностроение, 1995.-496с.

55.Обработка металлов резанием: Справочник технолога/ А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общей редакцией А.А. Панова.-М.: Машиностроение, 1988.-736с.: ил.

56. Гузель В.З. Турбоабразивная обработка деталей после обработки резанием// Технология - 96: Сб.науч.тр. межд.конф, - Новгород: НовГУ, 1996, - 4.11. - С.97-98.

57.А.с. 302225 СССР, МПК B24B 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

58. 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
- 59.Орлов П.Н. “Алмазно-абразивная доводка деталей” М.: ВНИИМАШ, серия С-Х-Ч, 1972, -198с.ил.
60. Лурье Г.Б. Основы технологии абразивной доводочно-притирочной обработки. [Текст]: Г.Б. Лурье В.В. Масловский - М., "Высшая школа", 1973.
61. Синкенкес Дж. Руководство по обработке драгоценных и поделочных камней. [Текст] / Дж. Синкенкес // Перевод с английского. Москва. «МИР» 1989г. 415 с.-ил.
62. Панасов 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.
63. Дудко П.Д. Методика повышения производительности доводки металлов свободным абразивом [Текст]: Вестник машиностроения/П.Д.Дудко// №6,1980, с71-73
64. Фilonov И.П. Механика процессов обкатки/ Под.ред. П.И.Ящерицина.- Мн:- Наука и техника, 1985-328с.
- 65.Мирзоалиев И.М., Амонов И.Т. Обработка шаров большого диаметра. Республиканская научно-практич. конф., посвященная 35-летию кафедры «ТММС и И» ТТУ им. акад. М.С. Осими.- Душанбе: ЧДДМ «Бахт ЛТД», 2009-с. 35-38).
66. 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.(TJ); Мирзоалиев И. (TJ); Мирзоалиев А.И. (TJ); Мамадназарова М.С. (TJ) ; Амонов С.Т. (TJ) ; Назарзода Н.М. (TJ )

67. Патент №1797563А3, СССР, МПК B24 B31/02. Галтовочное устройство/ Г.В. Серга, А.Н. Куцериб; заявитель и патентообладатель Г.В. Серга, А.Н. Куцериб. №4928726; заявл. 18.04.91, опубл. 23.02.93. Бюл.№7.

68. Патент №566714, СССР, МПК B24 B31/02. 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

69. Патент №841925, СССР, МПК B24 B11/02. 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.

Патент №1797563А3, СССР, МПК B24 B31/02. Галтовочное устройство/ Г.В. Серга, А.Н. Куцериб; заявитель и патентообладатель Г.В. Серга, А.Н. Куцериб. №4928726; заявл. 18.04.91, опубл. 23.02.93. Бюл.№7.

70. Патент № TJ 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.

71. Патент №566714, СССР, МПК B24 B31/02. 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

72. Патент №841925, СССР, МПК B24 B11/02. 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.

73. Патент №1797563А3, СССР, МПК B24 B31/02. Галтовочное устройство/ Г.В. Серга, А.Н. Куцериб; заявитель и патентообладатель Г.В. Серга, А.Н. Куцериб. №4928726; заявл. 18.04.91, опубл. 23.02.93. Бюл.№7.

74. Патент №566714, СССР, МПК B24 B31/02. 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.

75. Патент №683888, СССР, МПК B24 B31/08. 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.

76. Патент №TJ 355, Республика Таджикистан, МПК 7 B24 B31/02, 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.

77.Патент РФ №2352447 B24 B11/02. Способ для обработки шариков из полудрагоценных камней и устройство для его осуществления/ Б.П. Борисов, Ю.Ф. Правдин заявл. 26. 11. 2007; опубл. 20.04.2009.

78..Патент РФ №2481186 B24B11/10. Устройство для сферодоводки сферы/ В.В. Бернадский; заявл. 10. 10. 2011; опубл. 10.05.2013

79.Патент РФ №2481941 B24 B11/02. Устройство для сферодоводки шариков/ В.В. Бернадский; заявл. 07. 09. 2011; опубл. 20.05.2013.

80.Путолова Л.С. Самоцветные и цветные камни [Текст] / Л.С. Путолова. М.-: Недра. 1991, -192 с.

81.Патент РФ №2352447 B24 B11/02. Способ для обработки шариков из полудрагоценных камней и устройство для его осуществления/ Б.П. Борисов, Ю.Ф. Правдин заявл. 26. 11. 2007; опубл. 20.04.2009

82.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.

83. Авт. свид. №1549728 (СССР), М.кл. В24В 31/108. Центробежная установка для объемной обработки деталей /С.С. Фасатуров. -Опубликован 15.03. 1990-Б.И. №10, 1983.
84. Авт.свид. №1093508 (СССР), М.кл. В 24 В 31/08. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей / Л.Ф. Косухин, Н.С. Федотва - Опубл. 23.05.1984-Б.И.№19.
85. Мишин А.А. Долговечность двигателей. [Текст] / А.А. Мишин. - Л.: Машиностроение, 1966.-100с.
86. Орлов П.Н. Алмазно-абразивная доводка деталей.[Текст]: П.Н.Орлов М.: ВНИИМАШ, серия С-Х-Ч, 1972, -198с.ил.
87. Богомолов Н.И. Основные процессы взаимодействия абразива и металла. [Текст]: Афтореф...д-ра техн. наук . 05.03.01./ Н.И.Богомолов.— Киев.1967.-18с.]
88. 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.
89. Авт. свид. №1549728 (СССР), М.кл. В24В 31/108. Центробежная установка для объемной обработки деталей /С.С. Фасатуров. -Опубликован 15.03. 1990-Б.И. №10, 1983.
90. Авт.свид. №1093508 (СССР), М.кл. В 24 В 31/08. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей / Л.Ф. Косухин, Н.С. Федотва - Опубл. 23.05.1984-Б.И.№19.
- 91.<https://catalogmineralov.ru/mineral/ofiokalcit.html>
92. Патент № TJ 648 Таджикистан. МПК(2014),B24B1/00. 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

93. Патент. № TJ 647 Таджикистан.МПК(2014),B24B31/00. 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 (совпадение с 31)
94. Дунин-Барковский И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости.[Текст]: И.В. Дунин-Барковский, И.И.Карташова - М.: Машиностроение, 1978. - 232с.
95. 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.
96. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. Ю.П. Адлер М.: «Металлургия» 1969. – 155 с.
97. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. [Текст]: Ю.П.Адлер, Е.П. Маркова, Ю.В Грановский – М., Наука. 1970. – 283с.
98. Большев Л.Н.Таблицы математической статистики [Текст]: Л.Н.Большев, Н.В.Смирнов. М.: - Наука. 1965-474с.
99. Кацев П.Г. Статические методы исследования режущего инструмента. [Текст] / П.Г. Кацев. М.:Машиностроение. 1974, 231 с.
100. Колкер М.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. [Текст] / М.Д.Колкер. Киев, Изд-во Техника, 1976,- 200с.
101. Протодяконов М.М. Методика рационального планирования экспериментов. [Текст]: М.М. Протодяконов, Р.И.Тедер. М.: - Наука, 1970, -71с.
102. Пустыльник Е.И.Статистические методы анализа и обработка наблюдений. [Текст] / Е.И.Пустыльник. М.,1968, -288с.
103. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. [Текст] / И.С. Солонин. М.: Машиностроение. 1972. – 216с.
104. 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

105. Гамрат-Курек П.И. Выбор варианта изготовления изделий и коэффициента затрат. [Текст]: П.И.Гамрат-Курек, К.Ф.Иванов. – М., Машиностроение, 1975.-133с.
106. Мамаджанова, С. М, Мукимов, Р. С. Архитектурное наследие Худжанда, -С. 157.
107. Мамаджанова, С. М, Мукимов, Р. С. Архитектурное наследие Худжанда, -С. 159.
108. Мамаджанова, С.М. Архитектурные памятники Уструшаны VI-X вв. (исследование и реконструкция) / С.М. Мамаджанова // - Дисс ... канднд. архит. - М., 1983. - С. 379-85.
109. Мамаджанова, С.М. Традиции и современность в архитектуре Таджикистана (проблемы развития, взаимодействия и преемственности). / С.М. Мамаджанова /- Автореф. дисс ... докт. архит. - М., 1994. – С. 33.
110. Мамаджанова, С.М. Традиции и современность в архитектуре Таджикистана (проблемы развития, взаимодействия и преемственности). / С.М. Мамаджанова /- Автореф. дисс ... докт. архит. - М., 1994. –С. 36.
111. Мамаджанова, С.М., Мукимов, Р.С. Архитектурно-планировочная взаимосвязь жилищ средневекового Хорезма..., -С. 51-54.
112. Марков, Е.М. Условия формирования малых городов. – М: Стройиздат, 1988. - С. 278-298.
113. Марков, Е.М. Условия формирования малых населенных мест/ Е.М. Марков, Е.П. Бутузова // Справочник проектировщика. Градостроительство. – М: Наука. ЦНИИ-градостроительства. 1978. - С. 278-298.
114. Массон, В.М. Исторические реконструкции в археологии. - Самара, 1996. - 103 с., ил.
115. Массон, В.М. Первые цивилизации. – Л.: Наука, 1989. – 272 с., ил.
116. Массон, М.Е. Городище старого Термеза и их изучение. - Тр. УФ АН СССР, серия I. История, археология, вып. 2. ТАКЭ, 1936 г. - Т., 1940, -С.5-122.

117. Массон, М.Е. Поселение Джейтун: к истокам строительной техники/ М.Е. Массон // Проблемы истории архитектуры народов СССР. - Сб. научн. трудов. - № 2. – Л.: Наука, 1975. - С. 43-44.
118. Мелларт Дж. Древнейшие цивилизации Ближнего Востока. /Перев. с англ. – М.: Наука, 1982. - С. 6.
119. МИА СССР, № 66 (Тр. ТАЭ, т. III). - М.-Л.: АН СССР, 1958. - 389 с.
120. МИА СССР, № 15 (Тр. СТАЭ, т. I). - М.-Л.: АН СССР, 1950. - 52 с., ил.
121. МИА СССР, № 37 (Тр. СТАЭ, т. II). М.-Л.: АН СССР, 1953. - 316 с., ил.
122. Милотин, Н. А. Соцгород: Проблема строительства социалистических городов: Основные вопросы рациональной планировки и строительства населенных мест СССР/ Н. А. Милотин /— Москва-Ленинград: Госиздат, 1930. - 81 с., ил.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В  
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

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

[1-А].**Имомов Н.Б.** Влияние режимов резания на производительность процесса центробежной абразивной обработки шариков на станке с направляющими пластинами . Холов Ф.Б., Мирзоалиев И.М., Гулов С.С. /Наука и инновация. Таджикский национальный Университет. Серия геологических и технических наук 2024. №1. 19.03.2024. С-66-74. SSN2664-1534

[2-А].**Имомов Н.Б.** Экспериментальное исследование технологического процесса центробежной абразивной обработки самоцветных камней на станке с направляющими пластинами. /Наука и инновация. Таджикский национальный Университет. Серия геологических и технических наук 2023. №3. 20.09.2023. С-54-63 SSN2664-1534

[3-А]. **Имомов Н.Б.** Экспериментальное исследование процесса многодисковой абразивной обработки шариков из самоцветных камней. Мирзоалиев И., Холов Ф.Б. Пайеми Донишгохи Технологии Точкистон. №4 1(55). Душнбе 2023 С.17-24. ISSN2707-8000

[4-А].**Имомов Н.Б.** Экспериментальное исследование процесса многодисковой абразивной обработки шариков из самоцветных камней. / Холов Ф.Б., Мирзоалиев И. / Пайеми Политехники. №1. 1. 2023. С 4-11

[5-А].**Имомов Н.Б.** Исследование возможности обеспечение равномерности изнашивания инструмента при обработке на центробежном станке с направляющими пластинами / Мирзоалиев И., Холов Ф.Б., / Пайеми Политехники. №2. 25.10. 2023. С 4-9

[6-А].**Имомов Н.Б.** Планетарно-центробежная обработка заготовок из самоцветных камней. / Мирзоалиев И., Мирзоалиев А.И., Ходжаев Т.А., Холов Ф.Б./ Международный научный журнал “Научные горизонты” №8 (60) 31.08. 2022. С.

**Изобретения по теме диссертации**

[7-А]. Малый патент Республики Таджикистан № TJ 1199, МПК (2014), B24B31/00. Устройство для центробежной абразивной обработки шариков. / **Имомов Н.Б.**, Мирзоалиев А.И., Мамадназарова М.С., Амонов С.Т., Назарзода Н.М. / №2101573; заявл. 08.07.2021. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Таджикистан 3 ноября 2021 года.

[8-А]. Малый патент Республики Таджикистан № TJ 1589, МПК (2014), B2B31/02. Галтовочный барабан. / **Имомов Н.Б.**, Амонов С.Т., Мирзоалиев И., Мирзоалиев А.И., Холов Ф.Б., Ашурев К.Х., / №2401986; заявл. 29.07.2024. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Таджикистан 18 марта 2024 года.

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

[9-А]. **Имомов Н.Б.** Влияние жидкой фазы при галтовке на производительность процесса / Имомов Н.Б., Мирзоалиев И., Мамадназарова М.С., Мирзоалиев А.И. // Маводи конференсияи байналмиллалии илмӣ - амалии донишҷӯён, магистрон, унвонҷӯён ва олимони ҷавон «муҳандис 2019» с.25-30 ТТУ, Душанбе, 2019

[10-А]. **Имомов Н.Б.** Влияние количества абразива на производительность обработки при галтовке / Мирзоалиев И., Ходжаев Т.А., Мирзоалиев А.И. // Маводи конференсияи байналмиллалии илмӣ - амалии донишҷӯён, магистрон, унвонҷӯён ва олимони ҷавон «муҳандис 2019» с.21-25 ТТУ, Душанбе, 2019

[11-А]. **Имомов Н.Б.** Полезные ископаемые Таджикистана. / Мирзоалиев И., Мамадназарова М.С. Мирзоалиев А.И. // Материалы республиканской научно-практической конференции «проблемы металлургии таджикистана и пути их решения». (20-25 июня 2019г.) ст.118-126

[12-А]. **Имомов Н.Б.** Исследование влияния составляющей загрузочной массы на производительность обработки при галтовке. / Мирзоалиев И.М., Мамадназарова М.С., Мирзоалиев А.И. // Материалы 12-й международной научно-технической конференции. 13-15 ноября 2019 года. Минск. - С.257-260.

[13-А]. **Имомов Н.Б.** Обоснование выбора способа галтовки по производительности качества поверхности. / Мирзоалиев А.И. Мамадназарова М.С. // Материалы 12-й международной научно-технической конференции. 13-15 ноября 2019 года. Минск. - С.260-264.

[14-А]. **Имомов Н.Б.** Формообразование шаровидных изделий из самосветных камней при центробежной абразовной галтовке. / Т.А. Ходжаев, А.И. Мирзоалиев, А.Н. Убайдуллоев, Х.С. Содиков // Материалы международной научно-практической конференция. "Перспектива развития науки и образования" 20-21 ноября 2019 года. г Душанбе. С.118-123.

[15-А]. **Имомов Н.Б.** Исследование процесса формообразования шаровидных поверхностей из самоцветных камней в галтовочном барабане с горизонтальной осью вращения. / Ходжаев Т.А., Мирзоалиев И., Мирзоалиев А.И // Материалы международной научно-практической конференции. "Перспектива развития науки и образования" 20-21 ноября 2019 года. г Душанбе. С.83-87.

[16-А]. **Имомов Н.Б.** Исследование процесса формообразования шаровидных изделий из самоцветных камней в галтовочном барабане с канавками. / Ходжаев Т.А., Мирзоалиев И., Мирзоалиев А.И // Материалы международной научно-практической конференции. «Перспектива развития науки и образования» 20-21 ноября 2019 года г. Душанбе. С.87-91.

[17-А]. **Имомов Н.Б.** Исследование влияния соотношение жидкой и твердой составляющей загрузочной массы на производительность процесса галтовке / Мамадназарова М.С., Мирзоалиев И., Мирзоалиев А.И // Материалы конференции байналмиллалии илмӣ" Даҳсолаи Байналмиллалии амал Об барои рушди уствор" 2018-2028. «муҳандис 2021», ТТУ, Душанбе, 2021 с.338-341

[18-А]. **Имомов Н.Б.** Классификация существующих способ галтовки и области их применения / Мамадназарова М.С., Мирзоалиев И., Ходжаев Т.А. // Материалы VIII-й международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», -Душанбе, 3-4 ноября 2016.- С.109-112.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

### **Расчет экономической эффективности обработки**

#### **Экономическая эффективность процесса обработки шаров из самоцветных камней при центробежной абразивной галтовке**

Сравнением двух вариантов технологического процесса изготовления шаров диаметрами 40-60мм исходя из эксплуатационных показателей (производственного и проектного), определяем экономическую эффективность предлагаемого варианта.

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

Производственный вариант	Проектируемый вариант
1	2
Оборудование: 1. Станок галтовочный с горизонтальной осью вращения. 1.Стоимость станка -2500 сомон 2. Станок для профилирования шара-3200 сомон	Оборудование: 1. Станок для центробежной абразивной галтовки. Стоимость станка -9500сомон 2. Станок для профилирования шара-3200 сомон
<u>Операции – Барабанная галтовочная</u>  <u>1.Инструмент</u> – свободный абразив-электрокорунд зернистость 100мкм, – барабан галтовочный диаметр 0,5м 2.Обрабатываемый материал-шаровидная заготовка (куб с отрезанными гранями) из оникса	<u>Операции – Центробежная галтовка</u>  <u>1.Инструмент</u> – свободный абразив-электрокорунд зернистость 100мкм., галтовочная емкость диаметр 0,6 м 2. Обрабатываемый материал-шаровидная заготовка (куб с отрезанными гранями) из оникса
Тип производства – серийный Условия труда – нормальные.	Тип производства – серийный Условия труда – нормальные.

1	2
<p>Форма оплата труда – сдельная</p> <p>Количество оборудования необходимое для выполнения производственной программы: -</p> <p>галтовочный с горизонтальной осью вращения- 1 штука</p> <p>станок для профилирования шара - 4шт</p> <p>Коэффициент загрузки оборудования:-0,75.</p>	<p>Форма оплата труда – сдельная</p> <p>Количество оборудования необходимое для выполнения производственной программы:</p> <p>галтовочный с горизонтальной осью вращения- 1 штука</p> <p>станок для профилирования шара- 1шт</p> <p>Коэффициент загрузки оборудования:-0,85</p>
Годовая программа выпуска-16000	Годовая программа выпуска-16000
Штучное время выполнения операции при производственном варианте $T_{шт.}=55$ мин	Штучное время выполнения операции при проектном варианте $T_{шт.}=15$ мин

Приведенная годовая экономия определялась по формуле:

$$\mathcal{E}_\Gamma = \frac{C_{01} - C_{02}}{100} \cdot N_\Gamma, \quad (1)$$

где  $C_{01}$  и  $C_{02}$  – технологическая себестоимость сравниваемых операций.  
Технологическая себестоимость операции определялась как

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

где  $C_{п.з.} = C_3 + C_{ч.з.} + E_H(K_c + K_3)$  (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 капитальных вложений: для машиностроения  $E_H=0,15$ ;

$K_c$  – удельные часовые капитальные вложения в станок, определяемые по формуле (3), драм/час;

$$K_C = \frac{E_H * 100}{F_d * n_3} \quad (4)$$

$K_3$  - удельные часовые капитальные вложения в здание, определяемые по формуле (4), драм /час;

$$K_3 = \frac{F \cdot 78,4 \cdot 100}{F_d \cdot n_3} \quad (5)$$

Основную и дополнительную заработную плату, а также начисления на соцстрах оператору и наладчику можно определить по формуле

$$C_3 = C_{т.ф.} \cdot 1,53 \cdot k, \quad (6)$$

где  $C_{т.ф.}$  – часовая тарифная ставка рабочего соответствующего разряда, драм /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

$$k_m = \left( \frac{5,07\Gamma}{1000} + 1,11R + 0,63M_y \right) \frac{1}{20} \quad (8)$$

$\Gamma$ - балансовая стоимость станка определяемая как сумма оптовой цены станка и затрат на транспортирование и монтаж, составляющих 10% от оптовой цены станка, сом.;

$\Pi_6=15300$  сом. – цена станка по базовому варианту

$\Pi_6=15300 \cdot 1,1=16830$  сом.

$\Pi_{\text{пр}}=2000$  сом. – цена станка по проектному варианту

$\Pi_{\text{пр}}=2000 \cdot 1,1=2200$  сом. (собственного изготовления)

$R$ - суммарная ремонтная сложность механической и электрической частей станка;

$$R = R_M + R_s \quad (9)$$

$R_1=10$ - 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.

[105]

Необходимо сопоставить два варианта технологического процесса изготовления шаров из лазурита.

Обрабатываемый материал – Обрабатываемый материал- шаровидная заготовка (куб с отрезанными гранями) из офиокальцита – 16000 штук/год.

Расчет по базовому технологическому процессу формообразования шаров

Обработка шаров при производственном варианте:

$\Pi_6=15300 \cdot 1,1=16830$  сомони;  $T_{\text{шт2}}=3,2$  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:

$$C_3 = C_{\text{т.ф.}} \cdot 1,53 \cdot k = 710 \cdot 1,53 \cdot 1 = 1086,3 \text{ дирам/час}$$

Часовые затраты по эксплуатации рабочего места:

$$C_{\text{ч.з.}} = C_{\text{ч.з.}}^{\text{б.у.}} \cdot k_M = 480 \cdot 2,88 = 1382 \text{ дирам/час}$$

где  $C_{\text{ч.з.}}^{\text{б.у.}} = 480$  дирам/час часовая тарифная ставка для рабочего 3-го разряда

$$k_M = \left( \frac{5,07\Psi}{1000} + 1,11R + 0,63M_y \right) \frac{1}{20} = 2,88$$

Капитальное вложение в станок (дирам/час) определяем по формуле:

$$K_C = \frac{\Psi_B * 100}{F_d * n_3} = \frac{16830 * 100}{2030 * 0,75} = 1105 \text{ дирам/час},$$

Капитальное вложение в здание (дирам/час)

$$K_3 = \frac{F \cdot 78,4 \cdot 100}{F_d \cdot n_3} = \frac{7,16 \cdot 78,4 \cdot 100}{2030 \cdot 0,8} = 34,56 \text{ дирам/час}$$

$$\text{где } F = 4 \cdot 1,79 = 7,16 \text{ м}^2$$

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

$$C_{\text{п.з.}} = 1086,3 + 1382 + 0,15 \cdot (1105 + 34,56) = 2639,234 \text{ дирам/час.}$$

Тогда, технологическая себестоимость составит:

$$C_{\text{п.з.}} = \frac{C_{\text{п.з.}} \cdot T_{\text{шт}}(\text{шт-к})}{60 \cdot R_B} = \frac{2639,2 \cdot 55}{60 \cdot 1,3} = 1861 \text{ дирам}$$

Проектный вариант изготовления шаров способом центробежной обработки  
 $\Psi_B = 9700 \cdot 1,1 = 10670$  сомонии;  $T_{\text{шт2}} = 15$  мин.;  $f = 1,25 \times 1,1 = 1,375 \text{ м}^2$ ;  $E_H = 0,15$ .

Часовые приведенные затраты можно определить по формуле:

$$C_{\text{п.з.}} = C_3 + C_{\text{з.п.}} + E_H * (K_C + K_3),$$

Основная и дополнительная зарплата с начислениями с учетом  
многостаночного обслуживания:

$$C_3 = 1,53 \cdot C_{TF} \cdot k_M = 1,53 \cdot 610 \cdot 1 = 933,3 \text{ дирам/час},$$

Часовые затраты по эксплуатации рабочего места:

$$C_{ч.з.} = C_{ч.з.}^{б.у.} \cdot k_M = 480 \cdot 1,06 = 508 \text{ дирам/час}$$

где  $C_{ч.з.}^{б.у.} = 480$  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:

$$K_C = \frac{\Pi_B \cdot 100}{F_d \cdot n_3} = \frac{10670 \cdot 100}{2030 \cdot 0,75} = 700,8 \text{ дирам/час},$$

Капитальное вложение в здание (дирам/час)

$$K_3 = \frac{F \cdot 78,4 \cdot 100}{F_d \cdot n_3} = \frac{5,5 \cdot 78,4 \cdot 100}{2030 \cdot 0,8} = 26,55 \text{ дирам/час}$$

$$F = 4 \cdot 1,375 = 5,5 \text{ м}^2.$$

Подставив значения, получаем:

$$C_{п.з.} = 933,3 + 508 + 0,15 \cdot (700,8 + 26,55) = 1550,4 \text{ дирам/час}$$

Тогда, технологическая себестоимость по проектному варианту составит:

$$C_{O2} = \frac{C_{п.з.} \cdot T_{шт(шт-к)}}{60 \cdot R_B} = \frac{1550,4 \cdot 15}{60 \cdot 1,3} = 298,2 \text{ дирам}$$

Полученные данные занесем в сводную таблицу 1 и рассчитаем годовой экономический эффект от внедрения наилучшего варианта.

Таблица 1 - Сравниваемые варианты обработки шариков из оникса

Наименование позиций	Варианты	
	базовый	проектный
Отличающиеся операции абразивной обработки		
Операция	Обработка по производственной технологии	Обработка по проектной технологии
Технологическая себестоимость, дирам/час	1861 дирам	298,2 дирам

Годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_\Gamma = \frac{C_{01} - C_{02}}{100} \cdot N_\Gamma = \frac{(1861 - 298,2)}{100} \cdot 4000 = 62512 \text{ сомони.}$$

Замена операций позволяет сократить технологический цикл изготовления изделия и снизить себестоимость его изготовления, что позволит получить дополнительную прибыль в размере 62512 сом.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

### **Акт внедрения**

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Генеральный директор

ООО «РУХОМ»

\_\_\_\_\_ Мухаббатов М.М.

« » « \_\_\_\_\_ » 2021 г.

### **АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

Мы нижеподписавшиеся, заведующие лабораторией кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» (ТММСиИ) Таджикского технического университета (ТТУ) имени академика М.С.Осими, Имомов Н.Б , с одной стороны, и главный технолог ООО « РУХОМ » Мухаббатов Дж. М., начальник производственного участка Рахматов Б.Н., с другой стороны, заключили настоящий акт о том, что в ООО «РУХОМ» проведены опытно-промышленные испытания и принято к внедрению **запатентованное под № TJ1119 «Устройство для центробежной абразивной обработки шариков ».** Были проведены испытания опытной установки с образцами таких камней как оникс, лазурит, аметист. Испытания показали, что производительность обработки при использовании данных установок в среднем в 2 раза выше, чем при традиционном способе изготовления шаров из самоцветных камней, а доля ручного труда при этом снижается на 70%. На этой установке можно обработать шары из различных материалов в диапазоне размеров 5 - 80 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 данного изобретения составляет 62512 сомон в год.

От ТТУ им.ак.Осими ООО « РУХОМ »

Зав. лабораторией Гл.технолог

Имомов Н.Б Мухаббатов Дж. М

Нач. производственного участка Рахматов Б.Н

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

## Грамоты и сертификаты по работе



## **ПРИЛОЖЕНИЕ 4**

### **Образцы обработанных камней**



**Шарики из офита, нанизанные в нити**



**Камни самоцветы после галтовки и полировки**



**Шары после формообразования**



**Исходное сырье и его формообразование в виде шариков**



## Исходное сырье и его формообразование



Шары из камня, пирамиды

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 5**

### **Станок для формообразования шариков**



**Станок для формообразования шариков из самоцветных камней**

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

### Технологический процесс изготовления декоративных шаров из лазурита

Номер операции	Содержание Операции ЗАГОТОВИТЕЛЬНАЯ	Оборудование (наименование, модель)	Приспособле- ния, приборы и инструменты	Режимы обработки			Наполнитель			Жидкостная среда			Содержание, в г/л
				Число оборотов	Обороты инструмента, подача заготовок	Соотношение деталей, наполнители и пустоты	Температура	Вид	Марка	ГОСТ, ТУ	Грануляция	Наименование компонентов	
№	—	—	Пк	Ппш	Vv:V <sub>H</sub> :V <sub>n</sub>	t°C	T	—	—	—	—	—	—
	Материал: заготовка природный <b>Офиокальцит</b> произвольной формы массой 3-5кг												
1	Проверить качество заготовок визуально на предмет отсутствия трещины.												
2	Установить заготовку на стол станка и закрепить												
3	Провести обработку в виде резания пластин толщиной 30-50 мм	Станок алмазно-отрезной		2200	120		30					Вода проточная	
4	Резать пластины на стержни с поперечным сечением 30x30 и 50x50			2200	120		30					Вода проточная	
5	Резать соответствующий стержень на кубики 30x30x30 и 50x50x50			2200	120		30					Вода проточная	
6	Резать вершины кубиков			2200	120		30					Вода проточная	
Инв.зап													







Инв.№ подп.	Подпись	Взам.инв.				20	30	0.5		60				
	3		Провести обработку заготовок											
	4		Выгрузить и отделить детали от наполнителя											
	5		Отбраковать поломанные заготовки											
	6		Промыть детали											
	7		Просушить детали											
	8		Проверить качество деталей визуально											
	9													
			</											

