

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет  
Промышленных технологий  
электроэнергетики и транспорта

Кафедра  
Технологии и оборудование  
машиностроения

Направление подготовки

15.04.05 Конструкторско-  
технологическое обеспечение  
машиностроительных производств

Магистерская программа

Металлообрабатывающие станки

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему

Станок специальный зубополировальный

ПГУ 15.04.05.03.00.00 ПЗ

(обозначение ВКР)

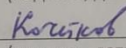
Студент гр. 19ММм2

  
(подпись, дата)

Липатов Алексей Николаевич

(фио полностью)

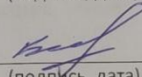
Научный руководитель

  
(подпись, дата)

Кочетков Д.В.

(фамилия, инициалы)

Нормоконтролер

  
(подпись, дата)

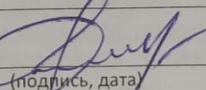
Большаков Г.С.

(фамилия, инициалы)

Рецензент

Начальник конструкторского бюро

АО ПО «Электроприбор», к.т.н.  
(должность, место работы)

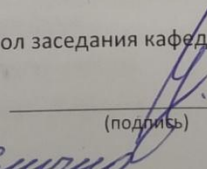
  
(подпись, дата)

Белашов М.В.

(фамилия, инициалы)

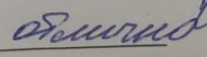
Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_)

Заведующий кафедрой

  
(подпись)

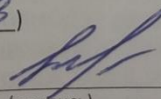
Зверовщиков А.Е.

(фамилия, инициалы)

Работа защищена с оценкой 

(протокол заседания ГЭК от 01.07.2021 № 3)

Секретарь ГЭК

  
(подпись)

Истомина Ю.В.

(фамилия, инициалы)

Пенза 2021

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой ТОМ А.Е. Зверовщиков

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

### ЗАДАНИЕ на магистерскую диссертацию

1. Студент группы 19ММм2

Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта  
направления 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»

Липатов Алексей Николаевич

2. Научный руководитель магистерской диссертации доцент Кочетков Д.В.

3. Время проектирования с 10 июня 2021 г. по 08 июля 2021 г.

4. Место преддипломной практики ПАО «Электромеханика», г. Пенза

5. Тема магистерской диссертации

Станок специальный зубополировальный

Тема утверждена приказом ПГУ № 1248а/о от 25.11.2019 г.

6. Техническое задание (цель проектирования, объект проектирования, его технические характеристики и т.п.)

Спроектировать специальный зубополировальный станок для полирования зубьев деталей «Триб» часового механизма скоростемера локомотива. Параметры: модуль зубьев триба (0,1 – 0,8) мм; число зубьев триба – до 64; ширина зубчатого венца триба (длина обработки) – до 20 мм; с обеспечением параметра шероховатости рабочей поверхности зубьев триба – не более  $Ra$  0,8. Разработать технологию выполнения операции зубополирования на спроектированном станке. Провести соответствующие экспериментальные исследования. Разработать состав полировальной пасты. Разработать технику безопасности эксплуатации станка.

7. Объем и содержание основной части работы

7.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, расчеты, обоснования, описания)

должна содержать обоснование актуальности темы диссертации, цель, объект и методы исследования, научную новизну и практическую ценность работы; анализ исходных данных и техническое задание на проектирование зубополировального станка, а именно, принцип работы механического скоростемера серии ЗСЛ-2М, анализ детали «Триб», анализ производственных и литературных данных по технологиям обработки трибов, расчет режимов резания при полировании; разработанную принципиальную

(технологическую) схему станка; разработанную структурную схему станка; составленную компоновочную схему станка; кинематический, силовой и динамический расчеты станка; результаты проектирования полировального круга; расчет противоскользящего станка; результаты разработанной трехмерной модели сборки станка и анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции; результаты разработки и экспериментальных исследований технологии обработки трибов на станке; результаты разработки состава полировальной пасты; технику безопасности эксплуатации станка; выводы по работе.

## 7.2. Графическая часть (перечень и содержание чертежей, плакатов)

- 1) Цель работы, объект исследования, научная новизна и практическая ценность.
- 2) Анализ исходных данных и техническое задание на проектирование зубополировального станка.
- 3) Проектирование зубополировального станка.
- 4) Разработка трехмерной модели сборки станка и анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции.
- 5) Разработка и экспериментальные исследования технологии обработки трибов на станке.
- 6) Разработка состава полировальной пасты.
- 7) Разработка техники безопасности эксплуатации станка.
- 8) Аprobация работы. Публикации по теме диссертации.
- 9) Основные выводы по работе.

## 8. Особые требования по выполнению разделов:

Разработку трехмерной модели деталей и сборки станка выполнить с применением программного продукта SolidWorks. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции проектируемого станка выполнить в SolidWorks Simulation.

## 9. Календарный график выполнения магистерской диссертации

| Наименование этапов работы          | Объем работы, % | Срок выполнения  | Подпись руководителя |
|-------------------------------------|-----------------|------------------|----------------------|
| 1) Оформление пояснительной записки | 80              | до 23.06.2021 г. | <i>Колесов</i>       |
| 2) Оформление презентации           | 20              | до 26.06.2021 г. | <i>Колесов</i>       |

Дата выдачи задания « 10 » 06 20 21 г. Задание к исполнению принял *Лич*

Руководитель работы *Колесов*

« 10 » 06 20 21

Магистерскую диссертацию к защите допустить

Декан Факультет промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта

*С.Ю. Киреев*

ОПОН сессия в полном объеме.  
К государственной итоговой аттестации допустить

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_ 20 \_\_\_\_

Изм.  
Разраб.  
Провер  
Н. конт  
Утв.

Пояснительная записка магистерской диссертации содержит 100 страниц основного текста формата А4, 36 рисунков, 6 таблиц, 18 источников литературы и 3 приложения.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ЗУБОПОЛИРОВАЛЬНЫЙ СТАНОК, ТРИБ, ФИНИШНЫЕ ОПЕРАЦИИ, СТРУКТУРНАЯ СХЕМА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА, КОМПОНОВОЧНАЯ СХЕМА, КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА, ДВИЖЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ, ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ, ПРОФИЛЬ ЗУБЬЕВ, КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ, СИЛОВОЙ РАСЧЕТ, ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ, ПОЛИРОВАЛЬНЫЙ КРУГ, ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ, СБОРКА, ПОЛИРОВАЛЬНАЯ ПАСТА, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В пояснительной записке приведены обоснование актуальности темы диссертации, цель и методы исследования, научная новизна и практическая ценность работы; анализ исходных данных и техническое задание на проектирование зубополировального станка, а именно, принцип работы механического скоростемера серии ЗСЛ-2М, анализ детали «Триб», анализ производственных и литературных данных по технологиям обработки трибов, расчет режимов резания при полировании; разработанная принципиальная (технологическая) схема станка; разработанная структурная схема станка; составленная компоновочная схема станка; кинематический, силовой и динамический расчеты станка; результаты проектирования полировального круга; расчет противовеса; результаты разработанной трехмерной модели сборки станка и анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкции; результаты разработки и экспериментальных исследований технологии обработки трибов; результаты разработки состава полировальной пасты; техника безопасности эксплуатации станка; выводы по работе.

|           |      |                 |                  |      |                                         |                              |      |        |
|-----------|------|-----------------|------------------|------|-----------------------------------------|------------------------------|------|--------|
|           |      |                 |                  |      | ПГУ 15.04.05.03.00.00 ПЗ                |                              |      |        |
| Изм.      | Лист | № докум.        | Подпись          | Дата | Станок специальный<br>зубополировальный | Лит.                         | Лист | Листов |
| Разраб.   |      | Липатов А. Н.   | <i>Липатов</i>   |      |                                         |                              | 3    | 158    |
| Провер.   |      | Кочетков Д. В.  | <i>Кочетков</i>  |      |                                         |                              |      |        |
| Н. контр. |      | Большаков Г. С. | <i>Большаков</i> |      |                                         | Кафедра «ТОМ»,<br>гр. 19ММм2 |      |        |
| Утв.      |      | Липов А. В.     | <i>Липов</i>     |      | Пояснительная записка                   |                              |      |        |

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                | 6  |
| 1 АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ<br>НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБОПОЛИРОВАЛЬНОГО СТАНКА.....                           | 9  |
| 1.1 Принцип работы механического скоростемера серии ЗСЛ-2М.....                                                              | 9  |
| 1.2 Анализ детали «Триб».....                                                                                                | 12 |
| 1.3 Анализ производственных и литературных данных по технологиям<br>обработки трибов.....                                    | 13 |
| 1.4 Расчет режимов резания при полировании.....                                                                              | 27 |
| 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБОПОЛИРОВАЛЬНОГО СТАНКА.....                                                                              | 29 |
| 2.1 Разработка принципиальной (технологической) схемы станка.....                                                            | 29 |
| 2.2 Разработка структурной схемы станка.....                                                                                 | 31 |
| 2.3 Составление компоновочной схемы станка.....                                                                              | 33 |
| 2.4 Кинематический расчет приводов станка.....                                                                               | 35 |
| 2.4.1 Расчет привода главного движения.....                                                                                  | 35 |
| 2.4.2 Расчет привода продольного перемещения.....                                                                            | 47 |
| 2.4.3 Разработка кинематической схемы станка.....                                                                            | 56 |
| 2.5 Силовой расчет станка.....                                                                                               | 56 |
| 2.6 Динамический расчет станка.....                                                                                          | 65 |
| 2.7 Проектирование полировального круга.....                                                                                 | 70 |
| 2.8 Расчет противовеса станка.....                                                                                           | 72 |
| 3 РАЗРАБОТКА ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ СБОРКИ СТАНКА<br>И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ<br>ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ..... | 76 |
| 4 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ<br>ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ТРИБОВ НА СТАНКЕ.....                                  | 86 |
| 5 РАЗРАБОТКА СОСТАВА ПОЛИРОВАЛЬНОЙ ПАСТЫ.....                                                                                | 92 |
| 6 РАЗРАБОТКА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ<br>ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАНКА.....                                                                | 95 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....                                                                                  | 97  |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                  | 99  |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А – ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ<br>НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНОГО<br>ЗУБОПОЛИРОВАЛЬНОГО СТАНКА..... | 101 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б – НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ.....                                                                 | 111 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В – ПРЕЗЕНТАЦИЯ.....                                                                        | 128 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В современном точном машино- и приборостроении важную роль играют финишные доводочные операции, обеспечивающие высокую чистоту рабочих поверхностей обрабатываемых деталей. К таким операциям относится и полирование, выполняемое на полировальных станках.

Зубополированные станки относятся к группе специальных станков и зачастую разрабатываются для обеспечения конструкторско-технологических параметров определенного типа деталей. Процесс полирования осуществляется полировальным кругом (полировальником), имеющим профиль обрабатываемых зубьев, который изготавливается из различных материалов, таких как дуб, бук, цветные сплавы, и смазывается полировальной пастой. В результате чего происходит сглаживание микронеровностей поверхности зуба.

Анализ принципа работы часового механизма скоростемера показал, что шероховатость рабочей поверхности зубьев триба оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики всего механизма. Шероховатость рабочих поверхностей зубьев триба должна быть не более  $Ra\ 0,8$  мкм и достигается применением доводочных (финишных) операций, таких как полирование, шлифование и т.п.

Анализ производственных и литературных данных по технологиям обработки трибов показал, что применение шлифовальных и хонинговальных станков приводит к увеличению стоимости обработки и к сложности осуществления быстрой переналадки станка под другой типоразмер обрабатываемых деталей, что является существенными недостатками. Использование полировальных станков свободно от указанных недостатков.

Таким образом, тема магистерской диссертации, связанная с проектированием специального зубополировального станка для полирования

зубьев деталей «Триб» часового механизма скоростемера локомотива, а также с разработкой технологии выполнения операции зубополирования на данном станке является актуальной.

**Цель магистерской диссертации** – проектирование специального зубополировального станка для полирования зубьев деталей «Триб» часового механизма скоростемера локомотива и разработка технологии выполнения операции зубополирования на спроектированном станке.

**Методы исследования.** Теоретические и экспериментальные исследования базируются на основных положениях станкостроения, технологии машиностроения и методе конечных элементов. При проведении экспериментальных исследований технологии выполнения операции зубополирования применялись поверенные и аттестованные средства измерения.

**Научная новизна.** Разработана технология выполнения операции полирования зубьев на спроектированном специальном зубополировальном станке.

**Практическая ценность.** Спроектирован специальный зубополировальный станок для полирования зубьев деталей «Триб» часового механизма скоростемера локомотива. Разработан состав специальной зубополировальной пасты.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты магистерской диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1) XXXI Научно-техническая конференция «Актуальные проблемы науки и образования» ПГУ секция «Металлообрабатывающие станки» (г. Пенза, 2021);

2) II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Техника и технология современных производств» (г. Пенза, 2021);

3) XII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Системы проектирования, моделирования,

подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM» (г. Пенза, 2021).

**Публикации.** По теме магистерской диссертации опубликовано 2 научные статьи в сборниках входящих в перечень РИНЦ:

1) Липатов, А.Н. Экспериментальные исследования влияния технологии полирования зубьев трибов на шероховатость поверхности / А.Н. Липатов, Д.В. Кочетков, И.Н. Баринов, А.В. Небылица // Техника и технология современных производств: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / МНИЦ ПГАУ. – Пенза: РИО ПГАУ, 2021. – С. 105–112.

2) Липатов, А.Н. Проектирование конструкции специального зубополировального станка с применением программы SolidWorks / А.Н. Липатов, Д.В. Кочетков., И.Н. Баринов, В.А. Кабанов, А.В. Небылица // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сборник статей XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2021. – С. 116–120.

# 1 АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБОПОЛИРОВАЛЬНОГО СТАНКА

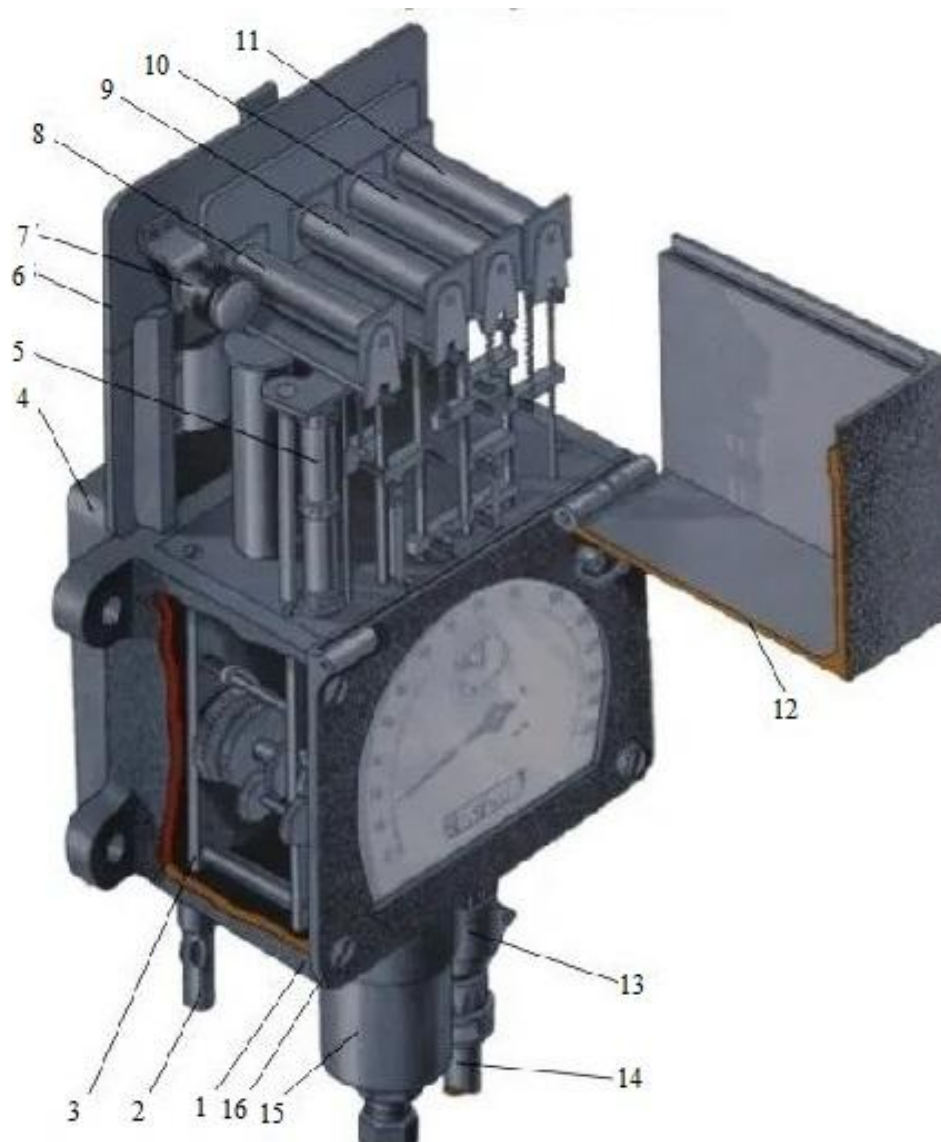
## 1.1 Принцип работы механического скоростемера серии ЗСЛ-2М

Локомотивные скоростемеры являются измерительно-регистрирующими устройствами, предназначенными для выполнения следующих функций:

- показание скорости движения, пройденного пути и суточного времени;
- регистрация скорости движения, пройденного пути и суточного времени движения и стоянок, направления движения, сигнальных огней локомотивного светофора, положения устройств автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия, давления воздуха в тормозной системе (режима торможения) и состояния системы автоматического управления тормозами;
- сигнализацией о контролируемых скоростях.

Скоростемер ЗСЛ-2М является показывающим, сигнализирующим, регистрирующим самопишущим измерительным прибором. Который регистрирует: скорость движения от 0 до 150 км/ч (или до 220 км/ч), суточное время в часах и минутах и суммарное количество километров, пройденных локомотивом, а также количество километров, пройденных за сутки, смену, рейс. Для регистрации параметров используется диаграммная лента: на 150 км/ч и на 220 км/ч.

На рисунке 1.1 показано устройство скоростемера ЗСЛ2М.



- 1 – корпус; 2 – приводной вал; 3 – механизм прибора;  
 4 – крышка контактного устройства; 5 – механизм регистрирующий;  
 6 – накладка откидная; 7 – патрон штифтовой;  
 8 – электромагнит регистрации белого огня;  
 9 – электромагнит регистрации красно – желтого огня;  
 10 – электромагнит регистрации красного огня;  
 11 – электромагнит регистрации включенного положения автостопа;  
 12 – крышка корпуса; 13 – разъем штепсельный; 14 – кабель;  
 15 – регистратор тормозного давления;  
 16 – крышка с прозрачным стеклом

Рисунок 1.1 – Устройство скоростемера 3СЛ-2М

На рисунке 1.2 представлена кинематическая схема часового механизма скоростемера ЗСЛ-2М.

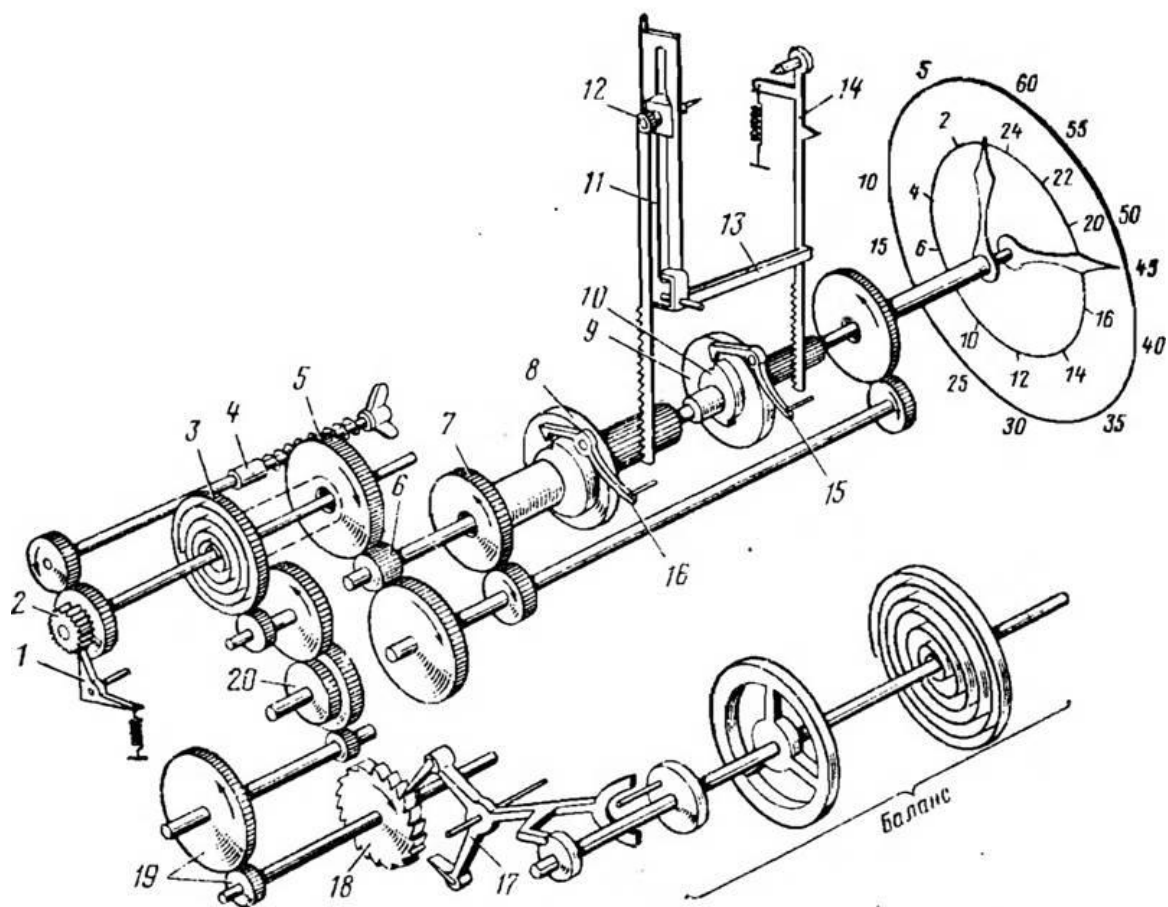


Рисунок 1.2 – Кинематическая схема часового механизма скоростемера ЗСЛ-2М

Часовой механизм скоростемера ЗСЛ-2М предназначен для показания времени на циферблате и его регистрации на ленте скоростемера [1].

Анализ принципа работы часового механизма скоростемера показал, что шероховатость рабочей поверхности зубьев триба оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики всего механизма.

Шероховатость рабочих поверхностей зубьев триба должна быть не более  $Ra\ 0,8\ \text{мкм}$  и достигается применением доводочных (финишных) операций, таких как полирование, шлифование и т.п.

## 1.2 Анализ детали «Триб»

Деталь «Триб» (поз. 18, см. рисунок 1.2) представляет собой деталь типа вал-шестерня, состоящую из валика и храпового колеса, качество поверхности зубьев которого существенно влияет на точность работы часового механизма.

На рисунке 1.3 представлен чертеж детали «Триб».

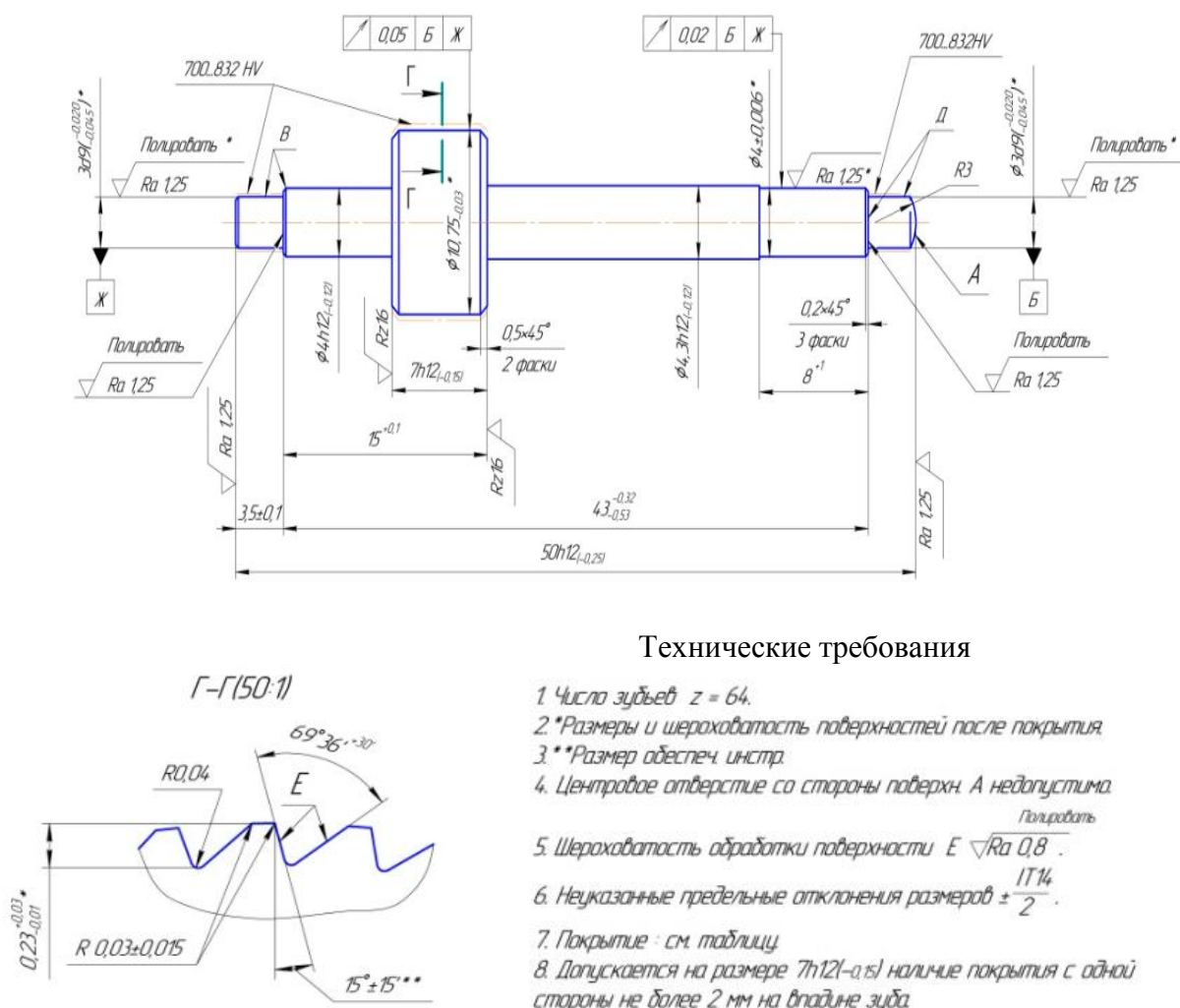


Рисунок 1.3 – Чертеж детали «Триб»

Как видно на рисунке 1.3, зубья имеют наклонный профиль, а необходимая шероховатость, обеспечивающая точность и правильность работы механизма должна быть не более  $Ra \ 0,8$  мкм.

Шероховатость поверхности зубьев, получаемая после операции нарезки зубьев на фрезерном станке (предыдущая операция) –  $Ra$  1,26 мкм, что не удовлетворяет конструкторско-технологическим требованиям, предъявляемым к детали.

Следовательно, необходимость в доводочной (финишной) операции обоснована.

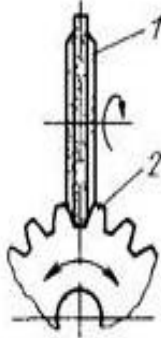
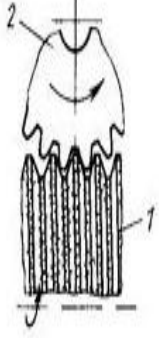
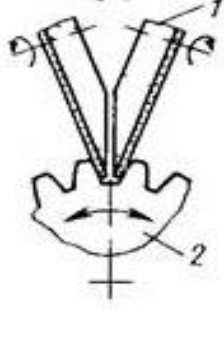
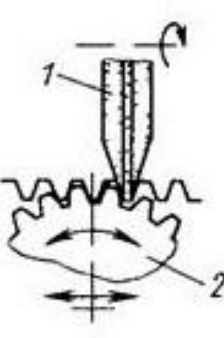
Для определения способа обработки поверхности зубьев, был проведен анализ технологии обработки зубьев трибов, представленный в разделе 1.3 магистерской диссертации.

### 1.3 Анализ производственных и литературных данных по технологиям обработки трибов

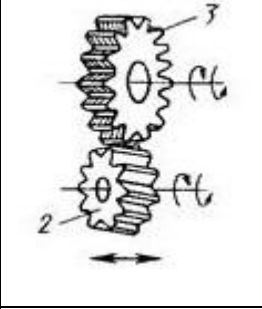
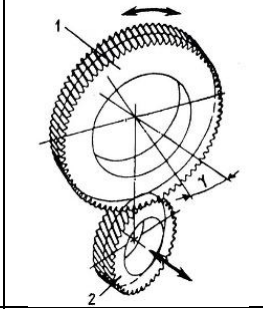
Для обеспечения требуемой геометрической точности параметров (см. рисунок 1.3) и получения шероховатости, поверхность зубьев трибов должна подвергаться отделочной обработке. Чистовая обработка деталей производится на финишных (отделочных) станках: шлифовальных, хонинговальных, шевинговальных, а также полировальных.

Методы обработки и степень точности зубчатых колес, реализующиеся на этих станках, приведены в таблице 1.1 [2, 3].

Таблица 1.1 – Методы обработки и степень точности зубчатых колес, реализующиеся на финишных (отделочных) станках

|                                  |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  |  |  |  |  |
| Степень точности по ГОСТ 1843-81 | Шлифование методом копирования                                                    | Шлифование методом обката абразивным червяком                                     | Шлифование методом обката с периодическим делением                                 |                                                                                     |
|                                  |                                                                                   |                                                                                   | двумя шлифовальным и кругами на станках типа 5853                                  | одним коническим шлифовальным кругом на станках типа 5A841                          |
| 2                                | -                                                                                 |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| 3                                | +                                                                                 | -                                                                                 | -                                                                                  | -                                                                                   |
| 4                                | +                                                                                 | -                                                                                 | +                                                                                  | -                                                                                   |
| 5                                | +                                                                                 | +                                                                                 | +                                                                                  | +                                                                                   |
| 6                                | +                                                                                 | +                                                                                 | +                                                                                  | +                                                                                   |
| 7                                |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |

Продолжение таблицы 1.1

| Степень<br>точнос-<br>ти по<br>ГОСТ<br>1843-81 |  |  |  |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--|
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--|

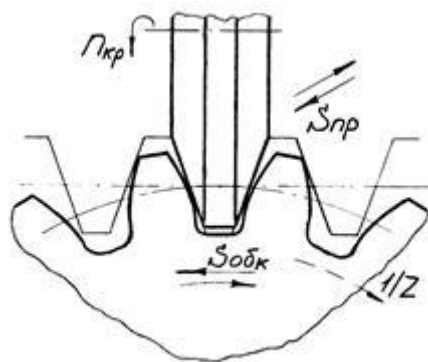
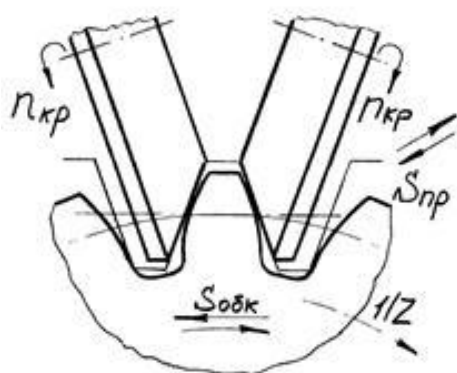


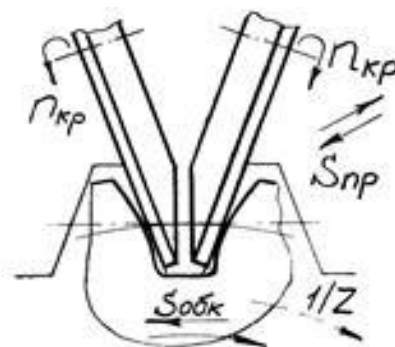
Рисунок 1.4 – Схема шлифования зубчатого колеса дисковым кругом

При шлифовании (рисунок 1.4) воспроизводится зацепление колеса с рейкой. Движение обката (перемещение и согласованный с ним поворот –  $S_{обк}$ ) совершает заготовка. Для обработки зуба по всей длине круг имеет продольную подачу  $S_{пр}$ .

По методу обката осуществляется шлифование чашечными (рисунок 1.5, а) и тарельчатыми (рисунок 1.5, б) кругами с периодическим делением на  $1/z$  [2, 3].



а)



б)

Рисунок 1.5 – Схема шлифования чашечными (а) и тарельчатыми (б) кругами

### *Шевингование.*

В процессе шевингования воспроизводится зацепление винтовой передачи с теоретически точечным контактом, которая возникает при

вращении на скрещающихся осях обрабатываемого колеса 1 и инструмента – шевера 2 (рисунок 1.6).

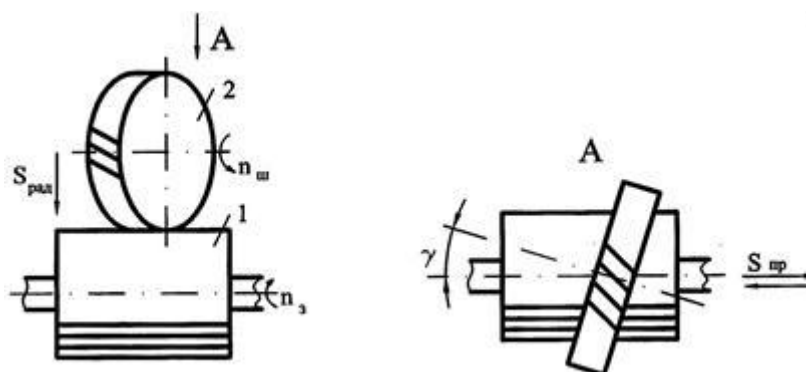


Рисунок 1.6 – Схема шевингования зубчатого колеса

При совместном вращении шевера и колеса возникает скольжение профилей, направленное вдоль зубьев. Это перемещение профилей образует движение резания, при котором режущие кромки канавок срезают с поверхностей зубьев колеса тонкие стружки. Образуется профиль зубьев колеса, сопряженный с профилем зубьев инструмента. Угол скрещивания  $\gamma$  находится обычно в пределах  $10^\circ \dots 20^\circ$ . Для обработки зубьев по всей длине колесо имеет продольную (по оси колеса) подачу ( $S_{\text{прод}}$ ), а для снятия всего припуска – радиальную подачу ( $S_{\text{рад}}$ ), которая прекращается при достижении заданной толщины зуба [2, 3].

### *Зубохонингование.*

Процесс зубохонингования заключается в свободном совместном обкате заготовки 2 и инструмента – хона 1, выполненного в виде зубчатого колеса из пластической массы в смеси с абразивным порошком (рисунок 1.7). Обкатка сопровождается относительными осевыми перемещениями хона и заготовки при небольшом окружном или радиальном давлении.

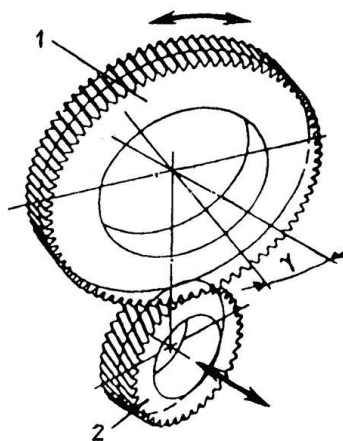


Рисунок 1.7 – Схема хонингования зубчатых колес

Припуск при зубохонинговании не превышает 0,05 мм на сторону. Хоны представляют собой довольно неточное зубчатое колесо. Его погрешности, в связи с упругостью и быстрым износом зубьев хона, незначительно влияют на точность обрабатываемого колеса [2, 3].

#### *Полирование.*

Зубополирование производится методом обкатки профиля зубьев.

Сущность процесса зубополирования состоит в относительном скольжении профиля червячного полировального диска 4 из мягкого металла или твердых сортов древесины (бук, дуб), смазанного полировальной пастой, и профиля зуба, сцепляющегося с ним обрабатываемого зубчатого колеса (триба) 1, установленного в приспособление 2, которому сообщается продольное перемещение (рисунок 1.8). В результате зубополирования происходит сглаживание микронеровностей поверхности зуба.

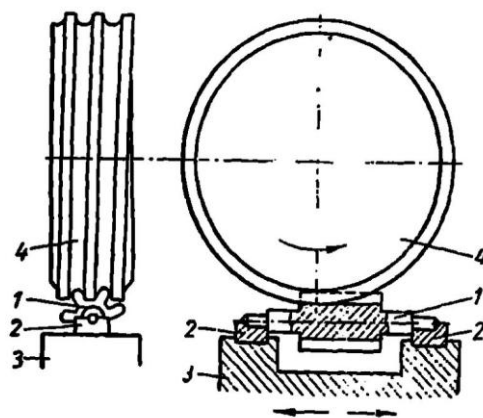


Рисунок 1.8 – Схема полирования зубьев триба

При полировании с поверхности металла тоже срезаются частицы, но мягкими, мелкозернистыми, округлыми и не имеющими острых кромок полировочными средствами, причем желаемое сглаживание поверхности получают лишь по достижении текучести металла одновременно на всей площади обработки. Когда изделие прижимают к вращающемуся полировальному кругу, на который нанесено полирующее средство, в месте их контакта происходит сильный нагрев, благодаря чему текучесть и пластичность металла возрастают настолько, что самые мелкие неровности стираются и сдавливаются, а выпуклости наоборот, смещаются в соединение углубления.

Пасты, применяемые в процессе зубополирования, состоят из абразивной и неабразивной частей [2].

Процесс полирования при помощи паст основан на одновременном механическом и химическом воздействии абразивной и неабразивной составляющих полировальной пасты. Абразивные зерна снимают с обрабатываемой поверхности тончайшие слои окисленного поверхностного слоя металла, а также осуществляют пластическое деформирование поверхностного слоя вследствие высокой температуры и значительного давления полировального круга на обрабатываемую поверхность [2].

В таблице 1.2 представлены параметры шероховатости, получаемы в процессе выполнения операций обработки зубчатых колес рассмотренных выше.

Таблица 1.2 – Параметры шероховатости, получаемые в процессе выполнения финишных (отделочных) операций

| Операция     | Достигаемая шероховатость поверхности, $R_a$ , мкм | Точность основных параметров поверхности, степень |
|--------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Шевингование | 0,63 – 0,16                                        | 4 – 6                                             |
| Шлифование   | 1,25 – 0,15                                        | 5 – 7                                             |
| Притирка     | 0,1 – 0,05                                         | 4 – 6                                             |
| Хонингование | 0,1 – 0,3                                          | 4 – 5                                             |
| Полирование  | 0,8 – 0,04                                         | 5 – 6                                             |

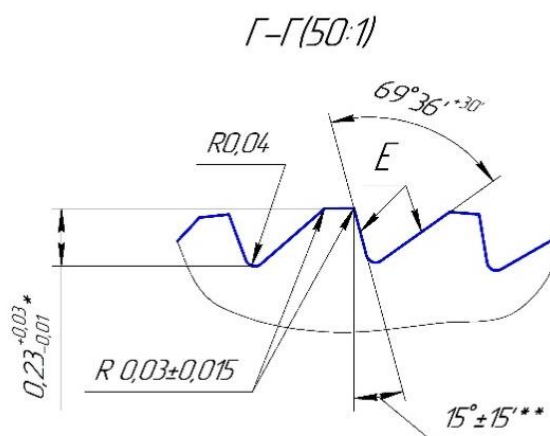


Рисунок 1.9 – Профиль зубьев триба детали «Триб»

В результате проведенного производственного и литературного анализа, установлено, что обеспечить требуемую шероховатость рабочих поверхностей «E» зубьев трибов (см. рисунок 1.9) могут все рассмотренные выше технологии, но возможностью качественно обработать профиль зубьев, т.е. обеспечить геометрическую точность параметров, могут только:

шлифовальные станки, обрабатывающие по методу обката; хонинговальные и полировальные.

Проведя анализ рынка, был подобран станок, соответствующий технологическим требованиям – это зубошлифовальный станок с ЧПУ QСMT&T YKS7225, способный обработать заданный профиль, обеспечив необходимое движение формообразования, общий вид которого представлен на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Общий вид зубошлифовального станка  
с ЧПУ QСMT&T YKS7225

В настоящее время, полирование зубьев трибов осуществляют на станках общего назначения, применяя для этого специальное устройство или используя для этого специальные станки настольного типа.



кривошипного валика с помощью шатуна движение передается суппорту, с установленной на нем обрабатываемой деталью. Суппорт, а вместе с ним и деталь совершает 150 двойных ходов в минуту [2].

На рисунке 1.12 показан общий вид трибополировального станка типа С-5 без механического привода продольного перемещения суппорта.

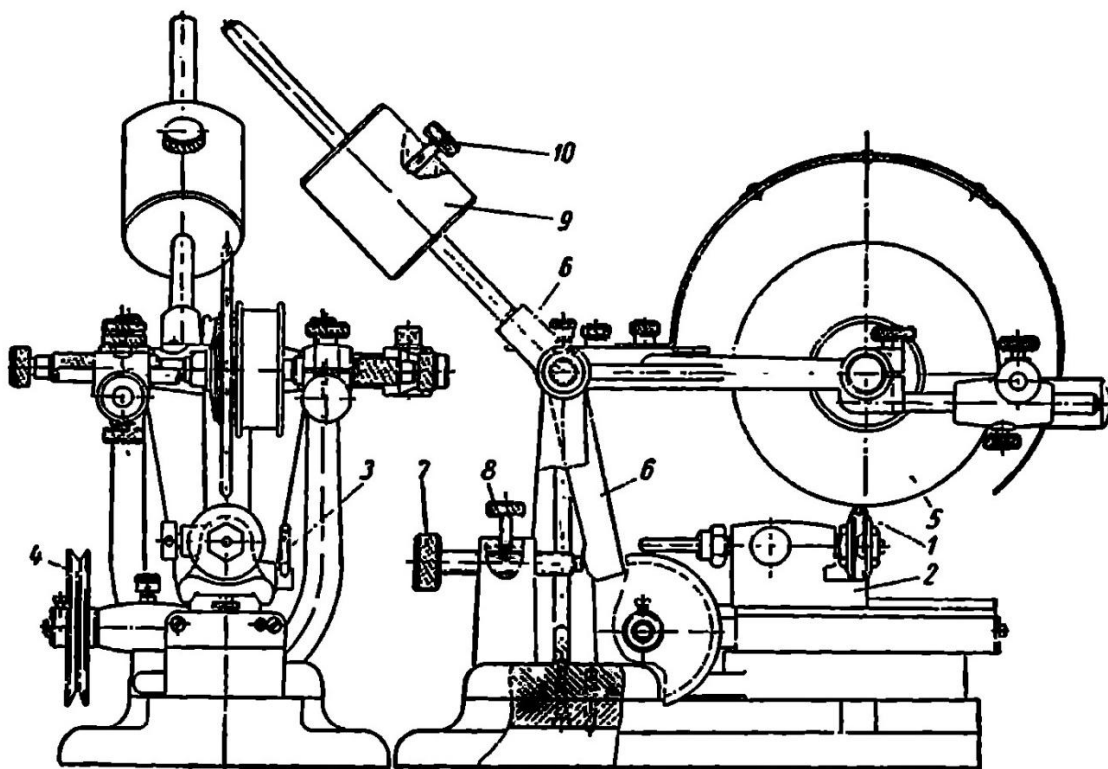


Рисунок 1.12 – Общий вид трибополировального станка С-5 без механического привода продольного перемещения суппорта

Обрабатываемая деталь триб 1 (рисунок 1.12) устанавливается на бабку суппорта 2, которая может перемещаться для обработки положения рукояткой 3. Установка обрабатываемой детали на бабку должна быть такой, чтобы она не имела осевого движения относительно подушек бабки. В том случае, если длина полируемого зуба трибки меньше 5 мм, полирование может производиться без возвратно-поступательного движения суппорта. При установлении величины возвратно-поступательных движений суппорта с укрепленной в нем деталью не следует допускать лишнего линейного перемещения суппорта. Величина продольного возвратно-поступательного

движения суппорта регулируется путем установки пальца кривошипа. Полировальник 5, укрепленный на рычаге 6, опускается на обрабатываемую деталь. В целях предотвращения возможных повреждений детали, рычаг 6 имеет ограниченный ход, регулируемый установочным винтом 7. После установки его в нежное положение установочный винт стопорится винтом 8. В процессе работы, по мере того как полировальник срабатывается, винт 7 регулируется. Для балансировки рычага 6 устанавливаемый стержень по которому может перемещаться противовес 9 и крепиться в нужном положении стопорным винтом 10. Станок имеет следующие габаритные размеры: длину 450 мм, ширину 230 мм и высоту 380 мм.

Достоинством станков серии С-5 (обоих исполнений) являются простота конструкции, наладки и настольное исполнение, а недостатками – неудобство обеспечения рабочего места системой ременных передач и вероятность проскальзывания ремня, что приводит к неравномерной обработки триба, т.е. снижению геометрической точности обрабатываемой детали и большой дисперсии параметра шероховатости [2].

На рисунке 1.13 показан общий вид Швейцарского станка для полирования зубьев триба модели Prata Typ 11, предназначенный специально для часовой промышленности и точной механики. Он способен обрабатывать детали модулем 0,2 – 0,8 мм, диаметром впадин от 6 мм до 12 мм, шириной венца – не более 10 мм.

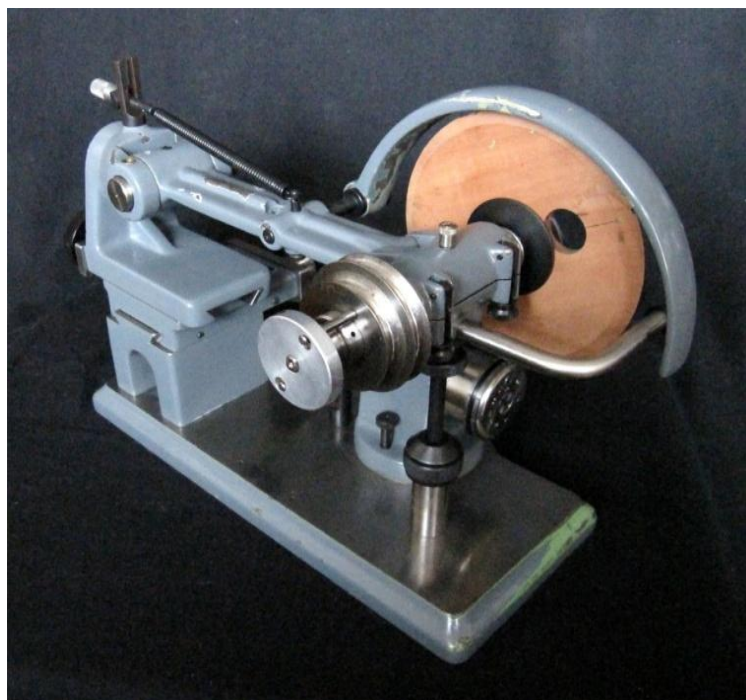


Рисунок 1.13 – Общий вид станка для полирования зубьев триба модели Prata Typ 11

Станок имеет две основные части: крестовые полозья с рычагом и деревянным полировальным диском; подкладной шпиндель с подкладками из твердого сплава. Полировальный шпиндель изготовлен из каленой и шлифованной стали. Чтобы отбалансировать вес полировального рукава напряжение пружины регулируется смещением крючка на фиксаторе. Крестовые полозья с полировальным рукавом перемещаются при помощи двух винтов с накатной головкой, вследствие чего облегчается выставление полировального диска к впадинам зуба.

Ограничительный болт станка служит ограничителем глубины полировального рукава. После точного регулирования этот болт блокируется гайкой. Износ полировального диска также регулируется этим же болтом. Точное направление шпинделя к оси насечек в подкладной шайбе из твердого сплава гарантировано, если цапфа сидит в соответствующем отверстии. После демонтажа цапфы этот шпиндель может также быть наклонен для полирования косозубых трибов. Шпиндель с подкладкой для заготовки выставляется штифтом точно по оси насечек и блокируется рычагом. Обе

подкладки из твердого сплава имеют по периметру V-образные насечки, в которые кладется заготовка. Оба диска соединены между собой так, что насечки всегда точно выставлены. Расстояние между двумя подкладками выставляется при помощи болта.

Деревянный полировальный диск необходимо сначала обточить перед полированием. На диск по периметру наносится полировальная паста. В диске имеется пропил. При помощи маленького клина этот пропил раздвигается так, что диск после каждого оборота зацепляет последующий зуб [5].

Недостатками станка модели Prata Тур 11 являются малый ресурс диска и вероятность его поломки в процессе установки клина в пропил, кроме того, процесс полирования происходит в одной точке, ввиду отсутствия осевого перемещения обрабатываемой детали во время обработки.

Проанализировав технологии обработки деталей трибов на шлифовальных и хонинговальных станках, установлено, что:

- шлифовальные станки могут обработать профиль зубьев триба детали только с применением специальной оснастки, ввиду малого количества моделей, обрабатывающих зубчатые колеса с диаметром впадин менее 10 мм и модулем 0,2 мм;

- для хонинговального станка требуется приобретение специального инструмента, соответствующего профилю триба, также проблемой подбора зубохонинговального станка является диаметр заготовки, и необходимые движения формообразования, которые выполняют малое количество моделей станков данной группы.

Таким образом, применение шлифовальных и хонинговальных станков приводит к увеличению стоимости обработки и к сложности осуществления быстрой переналадки станка под другой типоразмер обрабатываемых деталей, что является существенными недостатками. Однако, использование полировальных станков свободно от указанных недостатков. Но приобретение станка для нужд предприятия ПАО «Электромеханика»

является затруднительным и экономически не целесообразным. В связи с этим руководство предприятия поставило задачу перед конструкторским отделом, в котором я работаю в должности инженера-конструктора, спроектировать подобный станок. Совместно с руководителем магистерской диссертации ПГУ было разработано техническое задание на проектирование специального зубополировального станка (см. Приложение А), которое легло в основу задания на магистерскую диссертацию.

#### 1.4 Расчет режимов резания при полировании

Расчет режимов резания начинается с выбора инструмента.

Исходные данные: для наружного полирования с продольной подачей; параметром шероховатости  $Ra$  0,8 мкм; материал заготовки – инструментальная углеродистая закаленная сталь до HRC65.

Принимаем полировальный круг из твердых пород древесины и полировальную пасту из окиси хрома.

Принимаем размеры полировального круга: диаметр  $D_{кр}=150$  мм; ширина  $B_{к}=20$  мм.

Определяем скорость полировального круга:

$$V_{к} = \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot n_{шп}}{60000},$$

где  $n_{шп}$  – частота вращения шпинделя;

$$n_{шп} = \frac{1000 \cdot V_p \cdot 60}{\pi \cdot D_{к}},$$

где  $V_p$  – скорость резания; для полирования  $V_p = 5,35$  м/с [6];

$$n_{шп} = \frac{1000 \cdot 5,354 \cdot 60}{3,14 \cdot 150} = 682 \text{ мин}^{-1},$$

$$V_{к} = \frac{3,14 \cdot 150 \cdot 682}{60000} = 5,35 \text{ м/с}.$$

Принимаем скорость продольного перемещения заготовки –  $V_3=10$  м/мин и глубину полирования, учитывая значения поворота заготовки на ход державки –  $t=0,003$  мм [6].

Определяем величину продольной подачи:

$$S = (0,2 \dots 0,4) \cdot B_k,$$

$$S = (0,2 \dots 0,4) \cdot 20 = 4 \dots 8 \text{ мм/об}.$$

Принимаем  $S=6$  мм/об.

Определение потребной мощности станка.

Мощность, затрачиваемая на резание [7]:

$$N_p = C_N \cdot V_s^z \cdot t^x \cdot S^y \cdot d^q,$$

где  $C_N$  – коэффициент, учитывающий условия полирования;

$x, y, z, q$  – показатели степени;

$V, t, S$  – элементы режима резания;

$d$  – диаметр полирования (диаметр заготовки).

Для круглого наружного полирования закаленной стали с подачей на каждый ход полировальным кругом [6]:

$$C_N=1,6; z=0,5; x=0,5; y=0,55; q=0,$$

тогда,

$$N_p = 1,6 \cdot 5,35^{0,5} \cdot 0,003^{0,5} \cdot 0,021^{0,55} \cdot 10,25 = 0,25 \text{ кВт}.$$

Значение мощности, затрачиваемой на резание необходимо для дальнейших стадий проектирования станка.

## 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБОПОЛИРОВАЛЬНОГО СТАНКА

Проектирование любого станочного оборудования невозможно без определения формообразующих движений станка, составления структурной и соответственно компоновочной схем.

### 2.1 Разработка принципиальной (технологической) схемы станка

В соответствии с геометрией детали «Триб», была составлена схема образования поверхности зубьев при полировании (рисунок 2.1).

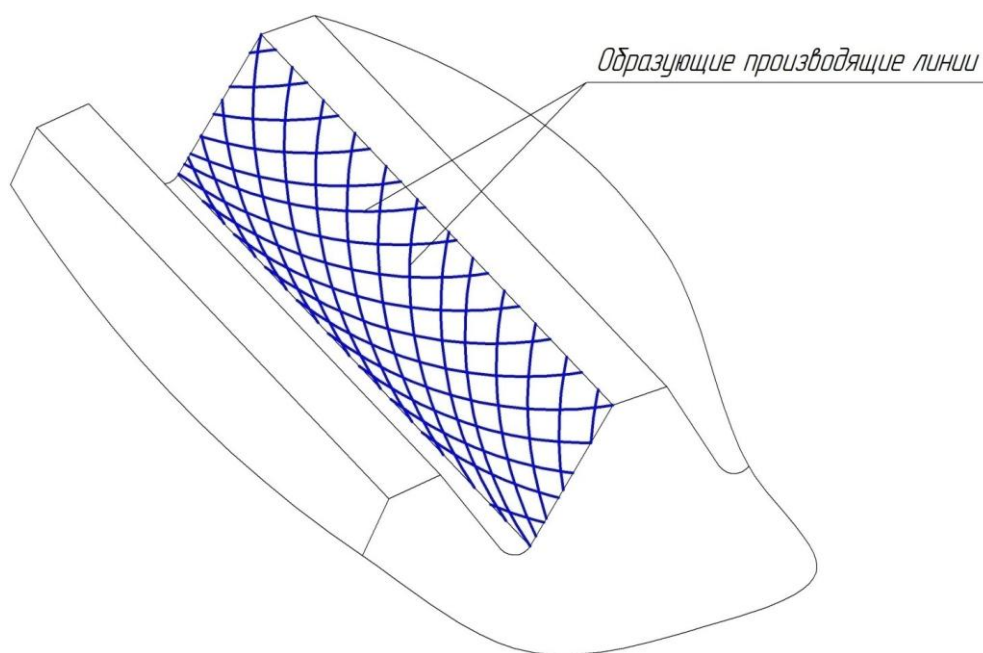


Рисунок 2.1 – Схема образования поверхности зубьев при полировании

Как видно на схеме (см. рисунок 2.1) для равномерной обработки всей поверхности зубьев необходимо обеспечить движения формообразования, создающие две симметрично направленные образующие производящие линии.

Создание требуемых образующих линий возможно при следующей разработанной принципиальной (технологической) схеме станка, показанной на рисунке 2.2.

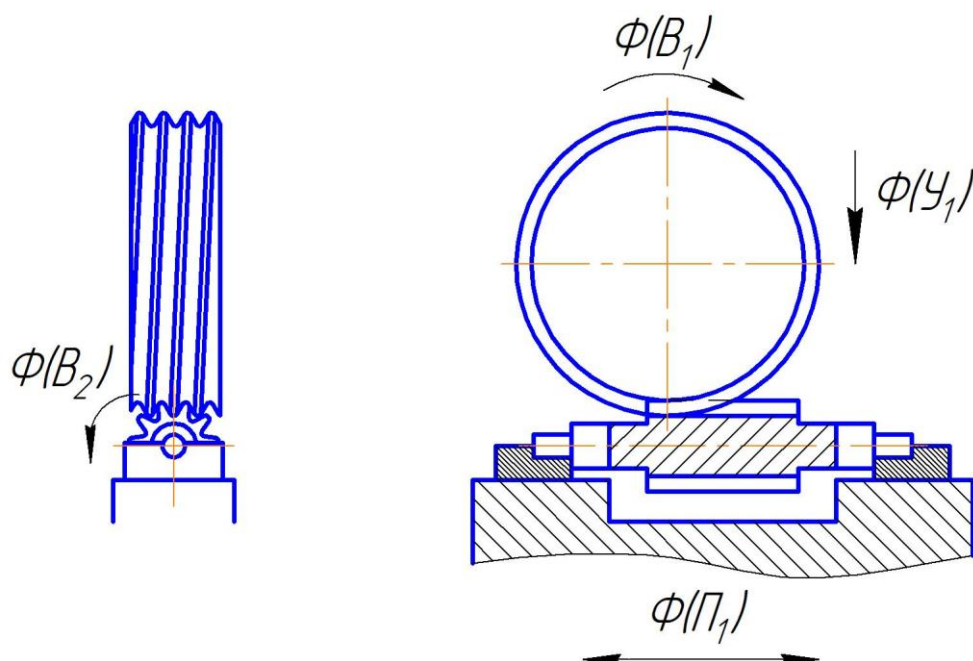


Рисунок 2.2 – Принципиальная (технологическая) схема станка

Как показано на схеме (рисунок 2.2), обработка поверхности происходит за счет выполнения трех движений:

- формообразующее движение  $\Phi(B_1)$ , создаваемое вращением полировального круга, и необходимое для обеспечения снятия металла в процессе обработки;
- формообразующее движение  $\Phi(\Pi_1)$ , создаваемое за счет продольного перемещения обрабатываемой детали относительно полировального круга, необходимое для обработки поверхности зубьев по всей ширине венца обрабатываемой детали;
- сложное формообразующее движение  $\Phi(B_2)$ , представляющее собой вращательное движение, участвующее в процессе образования поверхности, и выступающее по отношению к одной производящей линии в роли формообразующего движения, а по отношению к другой – составной частью сложного формообразующего движения, необходимого для образования второй производящей линии и обеспечению поворота обрабатываемой детали вокруг своей оси;
- установочное движение  $\Phi(Y_1)$  необходимо для обеспечения подачи полировального круга на обрабатываемую деталь.

Таким образом, предложенная принципиальная (технологическая) схема станка соответствует технологии обработки рассматриваемой детали «Триб» и она будет использована при разработке структурной схемы станка.

## 2.2 Разработка структурной схемы станка

Разработка структурной схемы является важнейшим этапом проектирования станка, поскольку на ней производится предварительная взаимная увязка движений рабочих органов проектируемого станка, поскольку эти движения обуславливают формообразование обрабатываемых поверхностей.

Проектирование структурной схемы происходит в несколько этапов:

### 1) Определяем движения формообразования:

Формообразующим движением является вращательное движение полировального круга  $\Phi_V(B_1)$ . Учитывая, что формообразующее движение  $\Phi_V(B_1)$  – простое, а траектория движения инструмента замкнутая, то необходимо настроить только два параметра, такие как направление ( $N$ ) и скорость вращения ( $V$ ) м/мин.

Формообразующие движения с меньшей скоростью, измеряемой величиной подачи  $S$  называются движениями подачи  $\Phi_S$ . В данном случае это будет поступательное движение  $\Phi_S(\Pi_1)$ , которое также является простым, но незамкнутым, а следовательно необходимо настроить четыре параметра, таких как направление ( $N$ ), скорость подачи ( $V$ ) мм/зуб, путь ( $L$ ) и конечная точка ( $K$ ).

### 2) Определяем установочные движения:

Установочное движение  $U_1$  предназначено для создания исходного положения заготовки и режущего инструмента перед движением формообразования. Этим движением обеспечиваются положения обрабатываемой поверхности и инструмента относительно движений

формообразования. В нашем случае, это будет обеспечиваться за счет качающегося кронштейна, на котором закреплен полировальник.

### 3) Определяем делительные движения:

Делительные движения  $D$  заготовки необходимы для переноса процесса формообразования на новый участок детали с целью равномерного расположения на заготовке одинаковых образуемых поверхностей. В данном случае это будет обеспечиваться за счет сложного формообразующего движения  $\Phi_v(B_2)$ , обеспечиваемого винтовой канавкой на полировальном круге. Благодаря которой полировальный круг будет представлять собой однозаходный червяк с шагом винтовой канавки, равным шагу зубьев обрабатываемого триба.

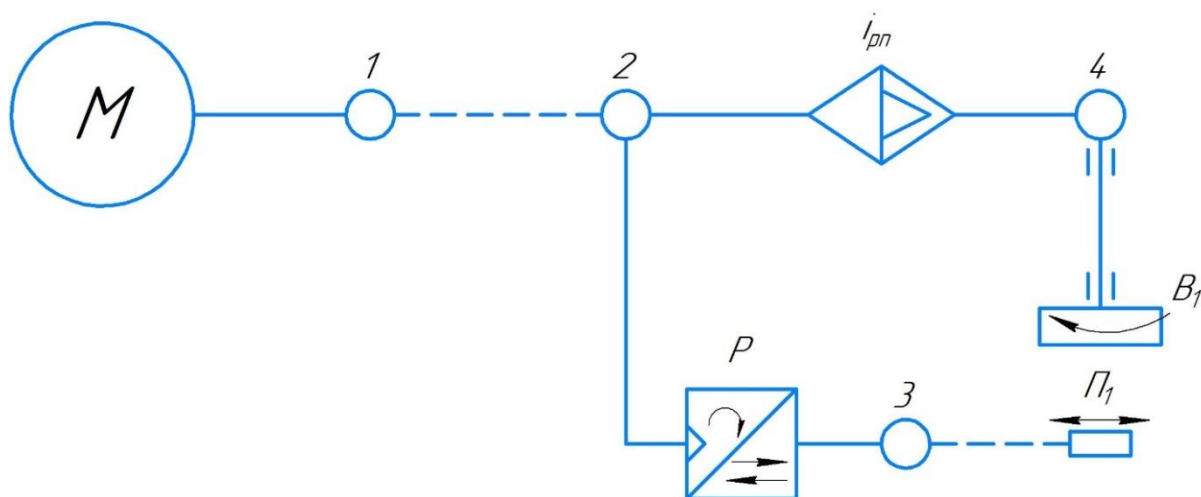


Рисунок 2.3 – Структурная схема  
специального зубополировального станка

На рисунке 2.3 обозначены: узлы механических связей: 1, 2, 3, 4;  $i_{pn}$  – передаточный механизм;  $P$  – механизм преобразования вращающего движения в возвратно – поступательное.

Таким образом, разработанная структурная схема станка специального зубополировального представлена на рисунке 2.3 и принимается для дальнейшего проектирования станка.

## 2.3 Составление компоновочной схемы станка

Разработка компоновки стана также является немаловажным этапом при проектировании станка. От которой зависит схема нагружения несущей системы силами резания и массой подвижных и неподвижных узлов.

Компоновка станка оказывает сильное влияние на экономическую эффективность станка, так как от выбора компоновки зависят металлоемкость, трудоемкость изготовления и сборки, занимаемая станком площадь и многие другие виды затрат как при изготовлении станка, так и в процессе его эксплуатации.

Исходя из определенных движений инструмента относительно обрабатываемой детали, ниже представлена вся совокупность возможных базовых компоновок.

Из всего множества возможных для заданных движений вариантов базовых компоновок выбираем один, наилучший для проектируемого станка и конкретных условий его использования на производстве.

Пользуясь символикой алгебры логики, составили матрицу для использования способа поразрядной конъюнкции. Уравнения в этой матрице представляют собой совокупность элементов станка, обеспечивающих необходимые движения формообразования [9].

$$\begin{array}{cc}
 M_1 & \left| \begin{array}{cc} o \overline{z} z \overline{o} & + o \overline{z} z o \\ o z \overline{z} o & + o z z o \end{array} \right. \\
 M_2 & \left| \begin{array}{cc} o \overline{z} z \overline{o} & + o \overline{z} z o \\ o z \overline{z} o & + o z z o \end{array} \right. \\
 \hline
 & \begin{array}{cc} OYzA & \Phi \\ OzAY & \end{array}
 \end{array}$$

Знак  $\Phi$  соответствует нуль-множеству, которое выражает противоречие условий.

Итак, совместное выполнение поставленных условий приводит к тому, что из всего множества компоновок, оказываются пригодными лишь два варианта представленных на рисунке 2.4.

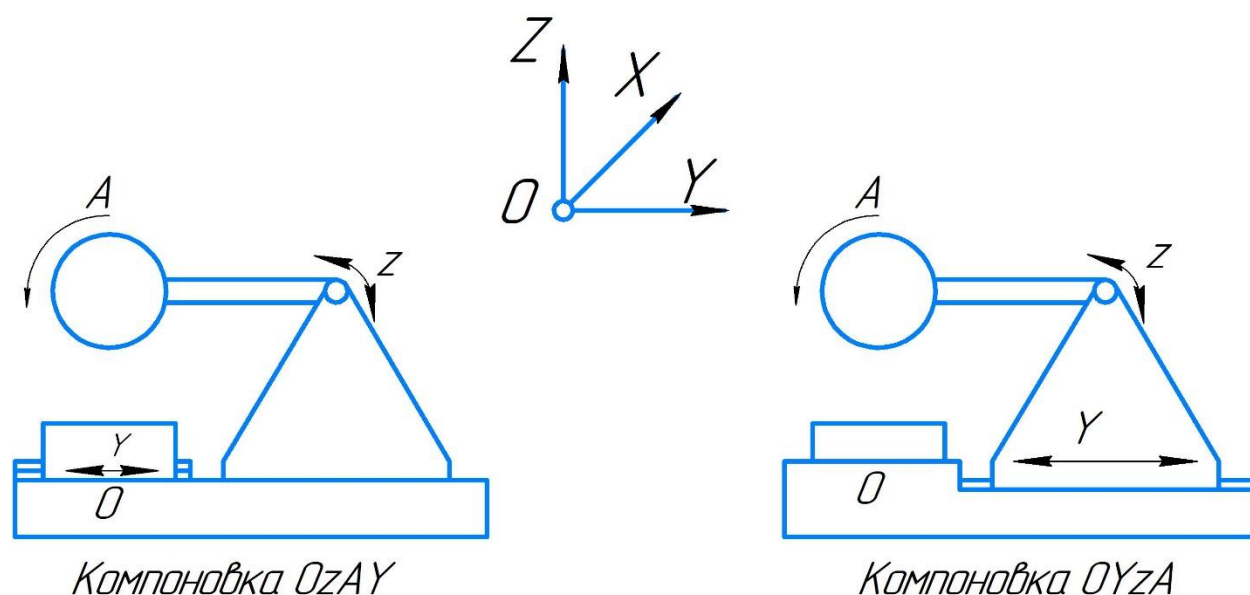


Рисунок 2.4 – Компоновки станка

На схемах (рисунок 2.4) буквами обозначены:  $O$  – неподвижный узел станка (станина),  $Y$  – подвижный узел, перемещающийся прямолинейно по соответствующей оси координат,  $z$  – дополнительное перемещение шпинделя по оси  $Z$ ,  $A$  – вращательное движение относительно оси  $X$ .

Проанализировав полученные компоновки, установили, что компоновка  $OzAY$  является более простой конструктивно и более удобной для обслуживания станка с точки зрения эргономики. Также, жесткая связь кронштейна шпинделя со станиной предотвратит возникновение дополнительных колебаний.

Таким образом, выбор компоновки  $OzAY$  является обоснованным и принимается за окончательный вариант для дальнейшего проектирования станка.



Таким образом,

$$\eta_{\text{пр}} = 0,96 \cdot 0,99 \cdot 0,96 \cdot 0,99 = 0,9 ,$$

$$P'_{\text{дв}} = \frac{0,25}{0,9} = 0,28 \text{ кВт}.$$

Общее передаточное число привода определяем по формуле [4]:

$$u_{\text{общ}} = u_{\text{рп1}} \cdot u_{\text{рп2}} ,$$

где  $u_{\text{рп1}}$  – передаточное число 1-ой ременной передачи;

$u_{\text{рп2}}$  – передаточное число 2-ой ременной передачи.

Принимаем  $u_{\text{рп1}} = 2 ; u_{\text{рп2}} = 1$ .

Тогда,  $u_{\text{общ}} = 2 \cdot 1 = 2$ .

Требуемую частоту вращения двигателя определяем по формуле:

$$n'_{\text{дв}} = u_{\text{общ}} \cdot n_{\text{шп}} = 2 \cdot 682 = 1364 \text{ мин}^{-1}.$$

Выбираем двигатель марки АИР63В4УЗ,  $P_{\text{дв}} = 0,37 \text{ кВт}$ ,

$$n_{\text{дв}} = 1500 \text{ мин}^{-1}, d_{\text{дв}} = 28 \text{ мм}.$$

После выбора  $n_{\text{дв}}$  определяем [4]:

$$u_{\text{общ}} = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{шп}}},$$

$$u_{\text{общ}} = \frac{1500}{682} = 2,2.$$

В соответствии с рекомендациями [4] принимаем:  $u_{\text{рп1}} = 2,2$  – передаточное число ременной передачи.

Окончательно распределив общее передаточное число привода по ступеням, определяем его расчетное значение  $u_{\text{ор}}$ . При этом отклонение его от требуемого не должно превышать 4% [4]:

$$\Delta u = \left| \frac{u_{\text{общ}} - u_{\text{ор}}}{u_{\text{общ}}} \right| \cdot 100\% \leq 4\% ,$$

где  $u_{\text{ор}} = u_{\text{рп1}} \cdot u_{\text{рп2}}$ .

Тогда,

$$u_{\text{оп}} = 2,2 \cdot 1 = 2,2 ,$$

$$\Delta u = \left| \frac{2,2 - 2,2}{2,2} \right| \cdot 100 \% = 0 \% < 4 \% - \text{условие выполняется.}$$

Частота вращения каждого вала определяется по формуле [4]:

$$n_1 = n_{\text{дв}} = 1500 \text{ мин}^{-1},$$

$$n_2 = \frac{n_1}{u_{\text{р1}}} = \frac{1500}{2,2} = 682 \text{ мин}^{-1},$$

$$n_{\text{шп}} = n_2 = 682 \text{ мин}^{-1}.$$

Мощность на каждом валу привода [4]:

$$P_1 = P_{\text{дв}} = 0,37 \text{ кВт},$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_{\text{рп1}} \cdot \eta_{\text{п}} = 0,37 \cdot 0,96 \cdot 0,99 = 0,35 \text{ кВт},$$

$$P_{\text{шп}} = P_2 \cdot \eta_{\text{рп2}} \cdot \eta_{\text{п}} = 0,35 \cdot 0,96 \cdot 0,99 = 0,33 \text{ кВт}.$$

Вращающие моменты на каждом валу привода [4]:

$$T_1 = 9550 \cdot \frac{P_1}{n_1} = 9550 \cdot \frac{0,37}{1500} = 2,35 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$T_2 = 9550 \cdot \frac{P_2}{n_2} = 9550 \cdot \frac{0,35}{682} = 4,9 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$T_{\text{шп}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{шп}}}{n_{\text{шп}}} = 9550 \cdot \frac{0,33}{682} = 4,62 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

#### Расчет ременных передач.

Ременная передача 1 – исходные данные (получены при кинематическом расчете):

$$T_1 = 2,35 \text{ Н} \cdot \text{м} ; T_2 = 4,9 \text{ Н} \cdot \text{м} ; n_{\text{дв}} = 1500 \text{ мин}^{-1} ; n_2 = 682 \text{ мин}^{-1} .$$

Для обеспечения передаточного отношения  $u_{\text{рп1}} = 2,2$  необходимо определить диаметры ведущего  $d_1$  и ведомого  $d_2$  шкивов.

Принимаем профиль Z(O) (из таблицы 4.1 [4]) и минимальный диаметр ведущего шкива  $d_{1\min} = 63 \text{ мм}$ . Расчетная ширина ремня  $w_p = 10 \text{ мм}$ ; площадь поперечного сечения  $A = 47 \text{ мм}^2$ .

Диаметр ведущего шкива определяем по формуле [11]:

$$d_1 = C \cdot \sqrt[3]{M_{\text{к.дв}}},$$

где  $C = 38 \dots 42$  — для ремней нормального сечения;

$C = 20$  — для узких ремней.

Тогда,

$$d_1 = 38 \cdot \sqrt[3]{2,35} = 50,5 \text{ мм}.$$

Принимаем  $d_1 = 63 \text{ мм}$  [4, с. 96].

Скорость ремня [4]:

$$V = \frac{\pi d_1 n_1}{60000},$$

$$V = \frac{3,14 \cdot 63 \cdot 1500}{60000} = 4,94 \text{ м/с}.$$

Диаметр ведомого шкива [4]:

$$d_2 = d_1 i_{\text{пр}} (1 - \varepsilon),$$

где  $\varepsilon = 0,015$  — относительное скольжение.

Следовательно,

$$d_2 = 63 \cdot 2,2(1 - 0,015) = 136,5 \text{ мм}.$$

Принимаем  $d_2 = 140 \text{ мм}$ .

Далее необходимо уточнить передаточное отношение [4]:

$$u_{\text{пр1}} = \frac{d_2}{d_1 (1 - \varepsilon)},$$

$$u_{\text{пр1}} = \frac{140}{63 (1 - 0,015)} = 2,25.$$

Оптимальное значение межосевого расстояния [4]:

$$a_{\text{опт}} = c d_2,$$

где  $c = \frac{a_{\text{опт}}}{d_2}$  принимается в зависимости от передаточного отношения [4],

принимая  $c = 1,35$ .

Тогда,

$$a_{\text{опт}} = 1,35 \cdot 140 = 189 \text{ мм}.$$

Определяем длину ремня [4]:

$$L_p = 2 a_{\text{опт}} + \pi d_{\text{ср}} + \frac{\Delta^2}{a_{\text{опт}}},$$

$$\text{где } d_{\text{ср}} = \frac{d_1 + d_2}{2}; \Delta = \frac{d_2 - d_1}{2}.$$

Следовательно,

$$d_{\text{ср}} = \frac{63 + 140}{2} = 101,5 \text{ мм},$$

$$\Delta = \frac{140 - 63}{2} = 38,5 \text{ мм},$$

$$L_p = 2 \cdot 189 + 3,14 \cdot 101,5 + \frac{38,5^2}{189} = 704,55 \text{ мм}.$$

Принимаем  $L_p = 710 \text{ мм}$  [4].

Далее необходимо уточнить [4]:

$$a = \frac{L_p - \pi d_{\text{ср}}}{4} + \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(L_p - \pi d_{\text{ср}})^2 - 8 \Delta^2},$$

$$a = \frac{710 - 3,14 \cdot 101,5}{4} + \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(710 - 3,14 \cdot 101,5)^2 - 8 \cdot 38,5^2} = 191,78 \text{ мм}.$$

Угол между ветвями ремня определяем по формуле [4]:

$$\gamma = 2 \cdot \arcsin \frac{\Delta}{a},$$

$$\gamma = 2 \cdot \arcsin \frac{38,5}{191,78} = 23,16^\circ.$$

Угол обхвата ремнем малого шкива определяем [4]:

$$\alpha = (180 - \gamma) > 120^\circ,$$

$$\alpha = (180 - 23,16) = 156,84^\circ.$$

Число пробегов ремня [4]:

$$U = \frac{1000 \text{ V}}{L_p},$$

$$U = \frac{1000 \cdot 4,94}{710} = 6,96 \text{ с}^{-1}.$$

Определяем диаметр шкива (эквивалентный) [4]:

$$d_e = d_1 \left( 1,14 - 0,14 e^{2,43(1-u_{pn})} \right),$$

$$d_e = 63 \left( 1,14 - 0,14 e^{2,43(1-2,25)} \right) = 71,39 \text{ мм}.$$

Определяем полезное напряжение [4]:

$$\sigma_t = (27,1 - 5,1 \cdot \lg U) W_p^{-0,421} - 49 \frac{W_p}{d_e} - 1,12 \cdot 10^{-3} V^2,$$

$$\sigma_t = (27,1 - 5,1 \cdot \lg 2,2) \cdot 10^{-0,421} - 49 \frac{10}{71,39} - 1,12 \cdot 10^{-3} \cdot 4,94^2 = 2,73 \text{ МПа}.$$

Определяем допускаемое полезное напряжение для проектируемой передачи:

$$[\sigma_t] = \frac{\sigma_t C_a}{C_p},$$

где  $C_a = 1,24 \cdot (1 - e^{-\frac{a}{110}}) = 1,24 \cdot (1 - e^{-\frac{156,84}{110}}) = 0,94$ ;  $C_p = 1,1$  из таблицы 4.2 [4].

Тогда,

$$[\sigma_t] = \frac{2,73 \cdot 0,94}{1,1} = 2,33 \text{ МПа}.$$

Определяем число ремней в передаче:

$$z' = \frac{F_t}{[\sigma_t] A},$$

где  $F_t = \frac{2000 T_1}{d_1} = \frac{2000 \cdot 5,18}{63} = 164,5 \text{ Н}.$

Тогда,

$$z' = \frac{164,5}{2,33 \cdot 47} = 1,5.$$

При таком числе ремней коэффициент  $C_z = 0,95$  [4].

Требуемое число ремней:

$$z = \frac{1,5}{0,95} = 1,57.$$

Принимаем  $z=1$ .

Фактический коэффициент тяги [4]:

$$\varphi = \frac{\varphi_0 C_a}{C_p},$$
$$\varphi = \frac{0,67 \cdot 0,94}{1,1} = 0,57.$$

Сила начального натяжения ремня определяется по формуле [4]:

$$F_0 = \frac{F_t}{2\varphi} = \frac{164,5}{2 \cdot 0,57} = 144,29 \text{ Н}.$$

Сила натяжения ведущей ветви ремня [4]:

$$F_1 = F_0 + \frac{F_t}{2} = 144,29 + \frac{164,5}{2} = 226,54 \text{ Н}.$$

Сила (действующую на вал) определяется по зависимости [4]:

$$F = 2F_0 z \cdot \cos \frac{\gamma}{2} = 2 \cdot 144,29 \cdot 1 \cdot \cos \frac{23,16}{2} = 288,58 \text{ Н}.$$

Максимальное расчетное напряжение в ремне по зависимости:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_1}{zA} + 61,25 \cdot \frac{W_p}{d_e} + 1,4 \cdot 10^{-3} V^2 =$$
$$= \frac{226,54}{1 \cdot 47} + 61,25 \cdot \frac{10}{71,39} + 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 4,94^2 = 13,43 \text{ МПа}.$$

Число циклов [4]:

$$\lg N = 13,6 - \frac{\sigma_{\max} W_p^{0,421}}{6,375} = 13,6 - \frac{11 \cdot 10^{0,421}}{6,375} = 9,05; N = 1,12 \cdot 10^9 \text{ циклов}.$$

Ресурс ремня (средний) определяем по зависимости:

$$L_{\text{hср}} = \frac{N}{7200 U S_T} = \frac{1,12 \cdot 10^9}{7200 \cdot 6,96 \cdot 4,75} = 4705,25 \text{ ч}.$$

Ременная передача 2 – исходные данные (получены при кинематическом расчете):

$$T_2 = 4,9 \text{ Н} \cdot \text{м} ; T_{\text{шп}} = 4,62 \text{ Н} \cdot \text{м} ; n_{\text{шп}} = 682 \text{ мин}^{-1} .$$

Для обеспечения передаточного отношения  $i_{\text{pn2}} = 1$  необходимо определить диаметры ведущего  $d_3$  и ведомого  $d_4$  шкивов:

Принимаем профиль Z(O) (из таблицы 4.1 [4]) и минимальный диаметр ведущего шкива  $d_{3\text{min}} = 63 \text{ мм}$ . Расчетная ширина ремня  $W_p = 10 \text{ мм}$ ; площадь поперечного сечения  $A = 47 \text{ мм}^2$ .

Диаметр ведущего шкива определяем по формуле [4]:

$$d_3 = C \cdot \sqrt[3]{T_{\text{кдв}}} ,$$

$$d_3 = 38 \cdot \sqrt[3]{4,9} = 64,45 \text{ мм} .$$

Принимаем  $d_3 = 80 \text{ мм}$  [4].

Скорость ремня [4]:

$$V = \frac{\pi d_3 n_2}{60000} ,$$

$$V = \frac{3,14 \cdot 80 \cdot 682}{60000} = 2,87 \text{ м / с} .$$

Диаметр ведомого шкива [4]:

$$d_4 = d_3 u_{\text{pn2}} (1 - \varepsilon)$$

$$d_4 = 80 \cdot 1 (1 - 0,015) = 78,8 \text{ мм} .$$

Принимаем  $d_4 = 80 \text{ мм}$ .

Необходимо уточнить [4]:

$$u_{\text{pn2}} = \frac{d_4}{d_3 (1 - \varepsilon)} ,$$

$$u_{\text{pn2}} = \frac{80}{80 (1 - 0,015)} = 1,01 .$$

Оптимальное значение межосевого расстояния [4]:

$$a_{\text{опт}} = c d_4 ,$$

$$a_{\text{опт}} = 1,35 \cdot 80 = 108 \text{ мм} .$$

Длина ремня [4]:

$$L_p = 2 a_{\text{опт}} + \pi d_{\text{ср}} + \frac{\Delta^2}{a_{\text{опт}}},$$

где  $d_{\text{ср}} = \frac{d_3 + d_4}{2}$ ;  $\Delta = \frac{d_3 - d_4}{2}$ .

Тогда,

$$d_{\text{ср}} = \frac{80 + 80}{2} = 80 \text{ мм},$$

$$\Delta = \frac{80 - 80}{2} = 0 \text{ мм},$$

$$L_p = 2 \cdot 108 + 3,14 \cdot 80 = 467,2 \text{ мм}.$$

Принимаем  $L_p = 500 \text{ мм}$  [4].

Тогда, уточненное значение:

$$a = \frac{L_p - \pi d_{\text{ср}}}{4} + \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(L_p - \pi d_{\text{ср}})^2 - 8 \Delta^2},$$

$$a = \frac{500 - 3,14 \cdot 80}{4} + \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(500 - 3,14 \cdot 101,5)^2} = 107,32 \text{ мм}.$$

Угол между ветвями ремня [4]:

$$\gamma = 2 \cdot \arcsin \frac{\Delta}{a},$$

$$\gamma = 2 \cdot \arcsin \frac{0}{107,32} = 0^\circ.$$

Угол обхвата ремнем малого шкива [4]:

$$\alpha = (180 - \gamma) > 120^\circ,$$

$$\alpha = (180 - 0) = 180^\circ.$$

Число пробегов ремня [4]:

$$U = \frac{1000 \text{ V}}{L_p},$$

$$U = \frac{1000 \cdot 2,97}{500} = 5,94 \text{ с}^{-1}.$$

Определяем диаметр шкива (эквивалентный) [4]:

$$d_e = d_1 \left( 1,14 - 0,14 e^{2,43 \left( 1 - i_{\text{пр}} \right)} \right),$$

$$d_e = 80 \left( 1,14 - 0,14 e^{2,43 (1-1)} \right) = 80 \text{ мм}.$$

Определяем полезное напряжение [4]:

$$\sigma_t = (27,1 - 5,1 \cdot \lg U) W_p^{-0,421} - 49 \frac{W_p}{d_e} - 1,12 \cdot 10^{-3} V^2,$$

$$\sigma_t = (27,1 - 5,1 \cdot \lg 2,2) \cdot 10^{-0,421} - 49 \frac{10}{80} - 1,12 \cdot 10^{-3} \cdot 2,97^2 = 3,48 \text{ МПа}.$$

Определяем допускаемое полезное напряжение для проектируемой передачи:

$$[\sigma_t] = \frac{\sigma_t C_a}{C_p},$$

где  $C_a = 1,24 \cdot (1 - e^{-\frac{a}{110}}) = 1,24 \cdot (1 - e^{-\frac{156,84}{110}}) = 0,94$ ;  $C_p = 1,1$  из таблицы 4.2 [4].

Тогда,

$$[\sigma_t] = \frac{3,48 \cdot 0,94}{1,1} = 2,97 \text{ МПа}.$$

Определяем число ремней в передаче:

$$z' = \frac{F_t}{[\sigma_t] A},$$

где  $F_t = \frac{2000 T_3}{d_3} = \frac{2000 \cdot 4,88}{80} = 122 \text{ Н}.$

Тогда,

$$z' = \frac{122}{2,97 \cdot 47} = 0,88.$$

При таком числе ремней коэффициент  $C_z = 0,95$  [4].

Требуемое число ремней:

$$z = \frac{1,5}{0,95} = 1,57.$$

Принимаем  $z=1$ .

Фактический коэффициент тяги определяем по формуле:

$$\varphi = \frac{\varphi_0 C_a}{C_p},$$

$$\varphi = \frac{0,67 \cdot 0,94}{1,1} = 0,57.$$

Сила начального натяжения ремня:

$$F_0 = \frac{F_t}{2\varphi} = \frac{122}{2 \cdot 0,57} = 107,01 \text{ Н}.$$

Сила натяжения ведущей ветви ремня:

$$F_3 = F_0 + \frac{F_t}{2} = 107,01 + \frac{122}{2} = 168,01 \text{ Н}.$$

Сила, действующую на вал:

$$F = 2 F_0 z \cdot \cos \frac{\gamma}{2} = 2 \cdot 107,01 \cdot 1 \cdot \cos \frac{23,16}{2} = 209,66 \text{ Н}.$$

Максимальное расчетное напряжение в ремне по выражению:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{F_3}{zA} + 61,25 \cdot \frac{W_p}{d_e} + 1,4 \cdot 10^{-3} V^2 = \\ &= \frac{209,66}{1 \cdot 47} + 61,25 \cdot \frac{10}{80} + 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,97^2 = 12,13 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Число циклов:

$$\lg N = 13,6 - \frac{\sigma_{\max} W_p^{0,421}}{6,375} = 13,6 - \frac{12,13 \cdot 10^{0,421}}{6,375} = 8,58; N = 1,12 \cdot 10^9 \text{ циклов}.$$

Определяем средний ресурс ремня:

$$L_{\text{hcp}} = \frac{N}{7200 U S_T} = \frac{1,12 \cdot 10^9}{7200 \cdot 5,94 \cdot 4,75} = 5513,22 \text{ ч}.$$

На рисунке 2.6 представлен график чисел оборотов шпинделя проектируемого станка.

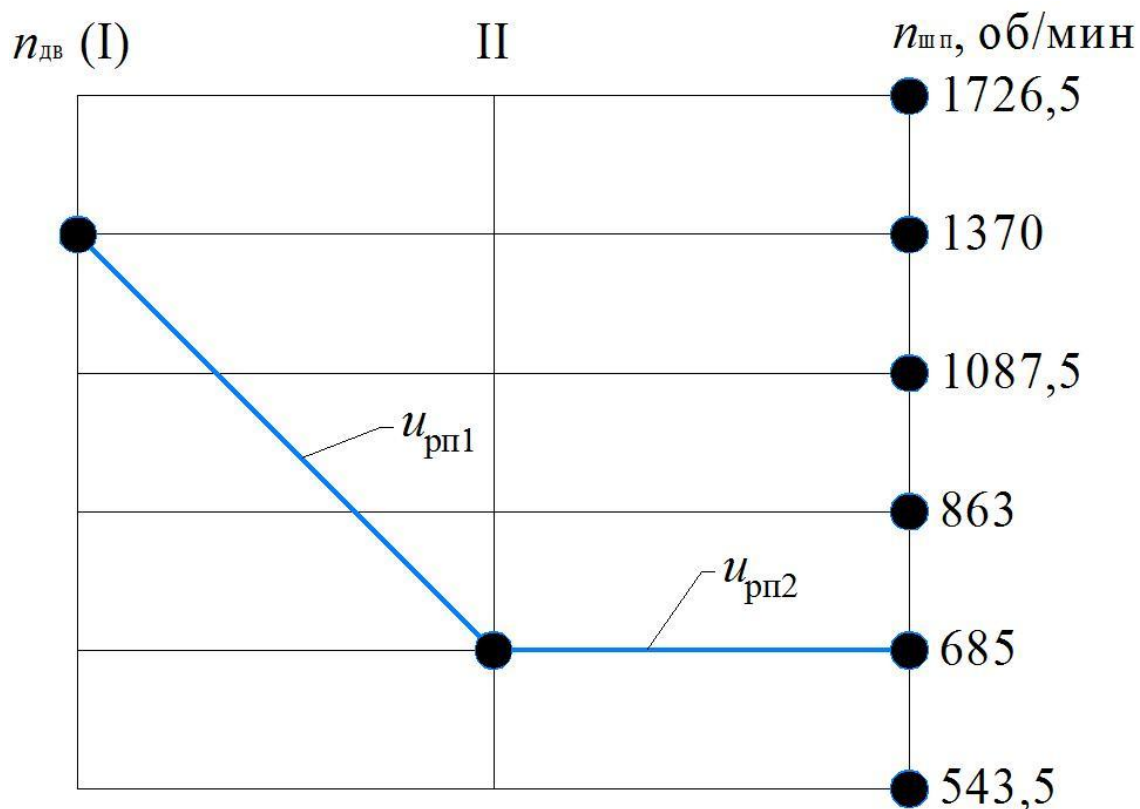


Рисунок 2.6 – График чисел оборотов проектируемого станка

#### Определение компоновочных размеров.

Определяем (предварительно) диаметры консольных участков входного вала [4]:

$$d_2 = (7 \dots 8) \sqrt[3]{T_2}.$$

$$d_2 = (7 \dots 8) \cdot \sqrt[3]{4,9} = (12,1 \dots 13,84) \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр под подшипник [4]:  $d_{п2} = 15 \text{ мм}.$

Выбираем подшипники лёгкой серии по ГОСТ8338-75: 202 [4].

Диаметр упорного буртика под подшипник [4]:

$$d_{бп} = d_{п} + 2 \cdot t.$$

где  $t$  – высота буртика, величину которого принимаем в зависимости от диаметра вала, принимаем  $t = 0,5 \text{ мм}$  ;

$$d_{бп2} = 15 + 2 \cdot 0,5 = 16 \text{ мм}.$$

Диаметр упорного буртика под колесо [4]:

$$d_{\text{БК}} = d_{\text{к}} + 2 \cdot t,$$
$$d_{\text{БК}} = 16 + 2 \cdot 0,5 = 17 \text{ мм.}$$

#### 2.4.2 Расчет привода продольного перемещения

Для продольного перемещения приспособления с трибом, необходимо определить число двойных ходов приспособления  $k$  [6]:

$$k = \frac{1000 \cdot V_{\text{р}}}{L \cdot (1 + m)}, \text{ дв. ход/мин.},$$

где  $V_{\text{р}} = 5,35$  м/мин – скорость резания;

$L = 20$  мм – длина хода приспособления;

$m = 1,35$  – отношение скорости рабочего хода к холостому.

Тогда,

$$k = \frac{1000 \cdot 5,35}{20 \cdot (1 + 1,35)} = 113,83 \text{ дв. ход/мин.}$$

Полученное число округляем до ближайшего целого значения. Следовательно, привод продольного перемещения станка должен совершать 114 дв. ход/мин.

Для обеспечения требуемого числа двойных ходов, необходимо определить передаточное число привода продольного перемещения:

$$u_{\text{нн}} = \frac{n_{\text{шп}}}{k},$$

где  $n_{\text{шп}}$  – число оборотов шпинделя;

$k$  – число двойных ходов приспособления.

Тогда,

$$u_{\text{нн}} = \frac{682}{114} = 5,98.$$

Принимаем передаточное число  $u_{\text{нн}} = 6$ .

### Проектный расчет на прочность зубчатой передачи.

Для станков шестерни и колеса следует изготавливать из одинаковых марок сталей с термической обработкой по двум вариантам [4].

Из таблицы 2.1 [4] выбираем материал для шестерни и колеса:

- Сталь 45, с термообработкой:
- Улучшение зубьев колеса + закалка ТВЧ  $HB\ 269...302$ ;
- Улучшение зубьев шестерни + закалка ТВЧ  $HRC50...55$ .

Определение допускаемых напряжений.

Допускаемые напряжения при расчетах на контактную и изгибную выносливость необходимо определять с учетом режима нагружения зубьев и требуемого ресурса передачи  $L_h$  (ч).

$$L_h = L_T \cdot 365 \cdot K_{год} \cdot 24 \cdot K_{сут} = 5 \cdot 365 \cdot 0,67 \cdot 24 \cdot 0,3 = 8803,8 \text{ ч.}$$

Определяем допускаемые напряжения для зубьев шестерни  $[\sigma_H]_1$  и колеса  $[\sigma_H]_2$  [4]:

$$[\sigma_H] = \frac{\sigma_{H \lim} Z_R Z_V}{S_H} Z_N,$$

где  $\sigma_{H \lim}$  – длительный предел контактной выносливости (таблица 2.2 [4]),

$$\overline{H}_{HRC\ 1} = \frac{50+55}{2} = 52,2 \text{ МПа,}$$

$$\overline{H}_{HB2} = \frac{269+302}{2} = 285,5 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{H \lim 1} = 17 \cdot \overline{H}_{HRC\ 1} + 200 = 17 \cdot 52,5 + 200 = 1092,5 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{H \lim 2} = 2 \cdot \overline{H}_{HB\ 2} + 70 = 2 \cdot 285,5 + 70 = 641 \text{ МПа};$$

$Z_R$  – коэффициент, учитывающий шероховатость рабочих поверхностей зубьев; при  $R_a=10...2,5$  мкм (фрезерование)  $Z_{R1}=1$ ;  $Z_{R2}=1$ ;

$Z_V$  – коэффициент, учитывающий влияние скорости, принимаем  $Z_{V1}=1,02$ ;  $Z_{V2}=1,03$ ;

$S_H$  – коэффициент запаса контактной прочности (таблица 2.2 [4]), принимаем  $S_{H1}=1,3$ ;  $S_{H2}=1,2$ ;

$$Z_N = \sqrt[6]{\frac{N_{H \lim}}{N_K}} - \text{коэффициент долговечности,}$$

$N_{H \lim}$  – число циклов нагружения зуба,  $N_{H \lim} = \overline{H_{HB}^3} \leq 12 \times 10^7$ ;

$$N_{H \lim_1} = (10 \cdot \overline{H_{HRC1}})^3 = (10 \cdot 52,5)^3 = 14,4 \cdot 10^7 \text{ циклов};$$

принимаем  $N_{H \lim_1} = 14 \cdot 10^7$  циклов;

$$N_{H \lim_2} = (10 \cdot \overline{H_{HB2}})^3 = (10 \cdot 285,5)^3 = 23,3 \cdot 10^6 \text{ циклов};$$

$N_{HE}$  – требуемый ресурс рассчитываемого зубчатого колеса [4]:

$$N_{HE} = 60 \cdot c \cdot n \cdot L_h \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \beta_1^3 + \alpha_3 \cdot \beta_2^3),$$

где  $c$  – число вхождений в зацепление зуба рассчитываемого колеса за один оборот:  $c_1=1$ ;  $c_2=2$ ;

$$N_{HE1} = 60 \cdot 1 \cdot 682 \cdot 8803,8 = 360,25 \cdot 10^6 \text{ циклов},$$

$$N_{HE2} = 60 \cdot 2 \cdot 113,6 \cdot 8803,8 = 60 \cdot 10^6 \text{ циклов}.$$

Коэффициент долговечности:

$$Z_{N1} = \sqrt[6]{\frac{14,4 \cdot 10^7}{360,25 \cdot 10^6}} = 0,85,$$

принимаем  $Z_{N1} = 1$ ;

$$Z_{N2} = \sqrt[6]{\frac{23,3 \cdot 10^6}{60 \cdot 10^6}} = 1,15,$$

принимаем  $Z_{N2} = 1,15$ .

Тогда,

$$[\sigma_H]_1 = \frac{1092,5 \cdot 1 \cdot 1,02}{1,3} \cdot 1 = 857,19 \text{ МПа},$$

$$[\sigma_H]_2 = \frac{641 \cdot 1 \cdot 1,03}{1,2} \cdot 1,15 = 632,72 \text{ МПа},$$

$$[\sigma_H] = 0,45 \cdot ([\sigma_H]_1 + [\sigma_H]_2),$$

$$[\sigma_H] = 1,23 \cdot [\sigma_H]_2,$$

$$[\sigma_H] = 0,45 \cdot (857,19 + 632,72) = 670,46 \text{ МПа},$$

$$[\sigma_H] = 1,23 \cdot 632,72 = 778,25 \text{ МПа.}$$

Принимаем  $[\sigma_H] = 670,46 \text{ МПа.}$

Определяем допускаемые напряжения изгиба зубьев шестерни  $[\sigma_F]_1$  и колеса  $[\sigma_F]_2$  [4]:

$$[\sigma_F] = \frac{\sigma_{F \text{ lim}}}{S_F} y_N ,$$

где  $\sigma_{F \text{ lim}}$  – длительный предел выносливости при «отнулевом» цикле нагружений (таблица 2.3 [4]):

$$\sigma_{F \text{ lim } 1} = 528,5 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{F \text{ lim } 2} = 1,75 \cdot \overline{H_{HB_2}} = 1,75 \cdot 285,5 = 500 \text{ МПа;}$$

$S_F$  – коэффициент запаса изгибной прочности (таблица 2.3 [4]), принимаем

$$S_{F_1} = 1,7; \quad S_{F_2} = 1,7;$$

$$y_N = \sqrt[m_F]{\frac{4 \cdot 10^6}{N_{FE}}} \text{ – коэффициент долговечности;}$$

$m_F$  – показатель степени кривой усталости;  $m_{F_1} = 9$ ;  $m_{F_2} = 6$ ;

$N_{FE}$  – требуемый ресурс рассчитываемого зубчатого колеса:

$$N_{FE} = 60 \text{ cn} L_h (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \beta_1^{m_F} + \alpha_3 \cdot \beta_2^{m_F}),$$

$$N_{FE1} = 60 \cdot 1 \cdot 682 \cdot 8803,8 = 360,25 \cdot 10^6 \text{ циклов,}$$

$$N_{FE2} = 60 \cdot 1 \cdot 113,28 \cdot 8803,8 = 60 \cdot 10^6 \text{ циклов.}$$

Коэффициент долговечности:

$$y_N = \sqrt[9]{\frac{4 \cdot 10^6}{360,25 \cdot 10^6}} = 0,6 ,$$

принимаем  $y_{N1} = 1$ ,

$$y_N = \sqrt[6]{\frac{4 \cdot 10^6}{60 \cdot 10^6}} = 0,63 ,$$

принимаем  $y_{N2} = 1$ .

Тогда,

$$[\sigma_F]_1 = \frac{528,5}{1,7} \cdot 1 = 310,88 \text{ МПа},$$

$$[\sigma_F]_2 = \frac{500}{1,7} \cdot 1 = 294 \text{ МПа}.$$

Проектный расчет на прочность привода продольного перемещения станка.

Исходные данные:

$[\sigma_H] = 670,46 \text{ МПа}; [\sigma_F]_1 = 310,88 \text{ МПа}, [\sigma_F]_2 = 294 \text{ МПа}; n_2 = 113,6 \text{ мин}^{-1};$   
 $T_1 = 4,9 \text{ Н·м}; T_2 = 29,42 \text{ Н·м}; u = 6.$

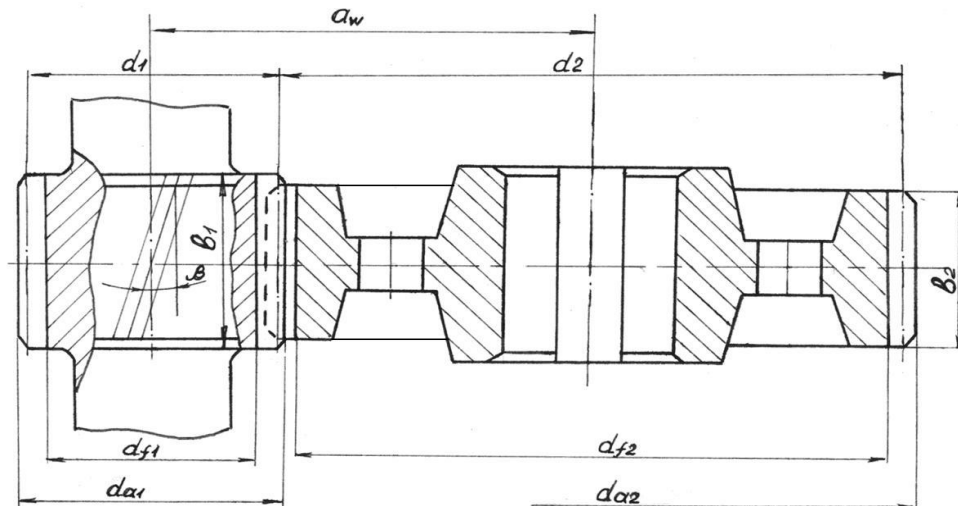


Рисунок 2.7 – Цилиндрическая зубчатая передача

Предварительное значение межосевого расстояния:

$$a'_w = k(u \pm 1)^3 \sqrt{\frac{T_2}{u^2}},$$

где знак «+» относится к внешнему зацеплению, а «-» к внутреннему;

$k$  – коэффициент зависящий от поверхностной твердости зубьев шестерни и колеса,  $k=8$ ,

$$a'_w = 8 \cdot (6 + 1)^3 \sqrt{\frac{29,42}{6^2}} = 52,35 \text{ мм}.$$

Уточняем [4]:

$$a_w = K_a (u \pm 1)^3 \sqrt{\frac{K_H \cdot T_2}{[\sigma_H]^2 \cdot u^2 \cdot \Psi_{ba}}}.$$

Принимаем  $\Psi_{ba} = 0,2$  [4].

Коэффициент нагрузки принимаем  $K_H=1,4$  [4].

$$a_w = 410 \cdot (6 + 1)^3 \sqrt{\frac{1,4 \cdot 29,42}{710,57^2 \cdot 6^2 \cdot 0,2}} = 89,25 \text{ мм}.$$

Ширина венца колеса [4]:

$$b_2 = \Psi_{ba} \cdot a_w,$$

$$b_2 = 0,2 \cdot 89,25 = 17,85 \text{ мм}.$$

Принимаем  $b_2 = 18 \text{ мм}$ .

Ширина венца шестерни:

$$b_1 = 1,12 \cdot b_2.$$

$$b_1 = 1,12 \cdot 18 = 20,16 \text{ мм}.$$

Принимаем  $b_1 = 22 \text{ мм}$ .

Значение нормального модуля:

$$m_{\min} \leq m \leq m_{\max}.$$

Минимальный модуль  $m_{\min}$  определяем по зависимости [4]:

$$m_{\min} = k_m \frac{k_F T_1 (u \pm 1)}{a_w b_2 [\sigma_F]_2},$$

где  $k_m = 3400$  – для прямозубых колес;

$k_F$  – коэффициент нагрузки, принимаемый равным  $K_H = 1,4$ .

Тогда,

$$m_{\min} = 3400 \cdot \frac{1 \cdot 4,9 \cdot (6 + 1)}{89,25 \cdot 18 \cdot 294} = 0,26 \text{ мм}.$$

Максимально допустимый модуль  $m_{\max}$  [4]:

$$m_{\max} = \frac{2 a_w \cos \beta}{z_{1\min} (u \pm 1)} \approx \frac{2 a_w}{17 (u \pm 1)},$$

$$m_{\max} = \frac{2 \cdot 89,25}{17 \cdot (6 + 1)} = 1,5 \text{ мм}.$$

Принимаем  $m_n = 1,5$  мм [4].

Суммарное число зубьев определяем по зависимости [4]:

$$z_{\Sigma} = z_2 \pm z_1 = \frac{2 a_w}{m_n}.$$

$$z_{\Sigma} = \frac{2 \cdot 89,25}{1,5} = 119,$$

округляем  $z_{\Sigma} = 119$ .

Число зубьев шестерни [4]:

$$z_1 = \frac{z_{\Sigma}}{u \pm 1} > z_{1\min}.$$

$$z_{1\min} = 17,$$

$$z_1 = \frac{119}{6 + 1} = 17.$$

Число зубьев колеса [4]:

$$z_2 = z_{\Sigma} - z_1,$$

$$z_2 = 119 - 17 = 102.$$

Фактическое значение передаточного числа:

$$u_{\phi} = \frac{z_2}{z_1},$$

$$u_{\phi} = \frac{102}{17} = 6.$$

Выполняем проверочный расчет на контактную выносливость [4]:

$$\sigma_H = \frac{Z_{\sigma}}{a_w u_{\phi}} \sqrt{\frac{K_H T_2 (u_{\phi} \pm 1)^3}{b_2}} \leq [\sigma_H],$$

где  $Z_\sigma = 9600$  для прямозубых передач.

Тогда,

$$\sigma_H = \frac{9600}{89,25 \cdot 6} \sqrt{\frac{1 \cdot 29,42 \cdot (6+1)^3}{18}} = 424,47 \text{ МПа} < [\sigma_H] = 670,46 \text{ МПа}.$$

Выполняем проверочный расчет на выносливость зубьев шестерни и колеса при изгибе [4]:

$$\sigma_F = \frac{2000 \cdot T \cdot K_F \cdot \cos \beta}{m_n^2 \cdot b \cdot z} y_{FS} y_\varepsilon \leq [\sigma_F],$$

где  $K_F = 1,95$  – коэффициент нагрузки [4];

$y_{FS}$  – коэффициент, учитывающий форму зуба и концентрацию напряжений (таблица 2.6 [4]).

Тогда при отсутствии смещения:

$$X=0 \quad - \quad y_{FS1} = 4,07; \quad y_{FS2} = 3,6.$$

$$\varepsilon_\alpha = \left[ 1,88 - 3,2 \left( \frac{1}{z_1} \pm \frac{1}{z_2} \right) \right].$$

где  $\varepsilon_\alpha$  – коэффициент торцевого перекрытия [4],

$$\varepsilon_\alpha = \left[ 1,88 - 3,2 \left( \frac{1}{17} + \frac{1}{102} \right) \right] = 1,66,$$

$$y_\varepsilon = \frac{1}{1,66} = 0,6;$$

$$\sigma_{F1} = \frac{2000 \cdot 5,18 \cdot 1,95}{1,5^2 \cdot 22 \cdot 17} \cdot 4,07 \cdot 0,6 = 58,62 \text{ МПа} < [\sigma_F]_1 = 310,88 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{F2} = \frac{2000 \cdot 29,42 \cdot 1,95}{1,5^2 \cdot 18 \cdot 102} \cdot 3,6 \cdot 0,6 = 59,99 \text{ МПа} < [\sigma_F]_2 = 294 \text{ МПа}.$$

Определяем геометрический размер передачи [4].

– делительный диаметр колес [4]:

$$d = m_n z,$$

$$d_1 = 1,5 \cdot 17 = 25,5 \text{ мм},$$

$$d_2 = 1,5 \cdot 102 = 153 \text{ мм},$$

проверка определения делительных диаметров колес:

$$d_1 + d_2 = 2a_w$$

$$25,5 + 153 = 2 \cdot 89,25 \text{ — условие выполняется;}$$

– диаметр вершин зубьев определяем по формуле [4]:

$$d_a = d + 2m_n(1 + x),$$

$$d_{a1} = 25,5 + 2 \cdot 1,5 \cdot (1 + 0) = 28,5 \text{ мм},$$

$$d_{a2} = 153 + 2 \cdot 1,5 \cdot (1 + 0) = 156 \text{ мм};$$

– диаметр впадин зубьев[4]:

$$d_f = d - 2,5m_n \cdot (1 + 0,8x),$$

$$d_{f1} = 25,5 - 2,5 \cdot 1,5 \cdot (1 + 0,8 \cdot 0) = 21,75 \text{ мм},$$

$$d_{f2} = 153 - 2,5 \cdot 1,5 \cdot (1 + 0,8 \cdot 0) = 149,25 \text{ мм}.$$

Определяем силы в зацеплении (рисунок 2.8) [4]:

– окружная сила:

$$F_t = \frac{2000 \cdot T_1}{d_1},$$

$$F_t = \frac{2000 \cdot 4,9}{25,5} = 406,27 \text{ Н};$$

– радиальную силу определяем по формуле[4]:

$$F_r = F_t \operatorname{tg} 20^\circ,$$

$$F_r = 406,27 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 147,87 \text{ Н}.$$

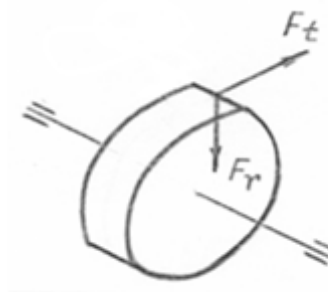


Рисунок 2.8 – Схема сил, действующих на вал от зубчатых колес  
в цилиндрической передаче

### 2.4.3 Разработка кинематической схемы станка

На рисунке 2.9 представлена кинематическая схема специального зубополировального станка, которая разработана с учетом проведенных выше расчетов привода главного движения и привода продольных перемещений.

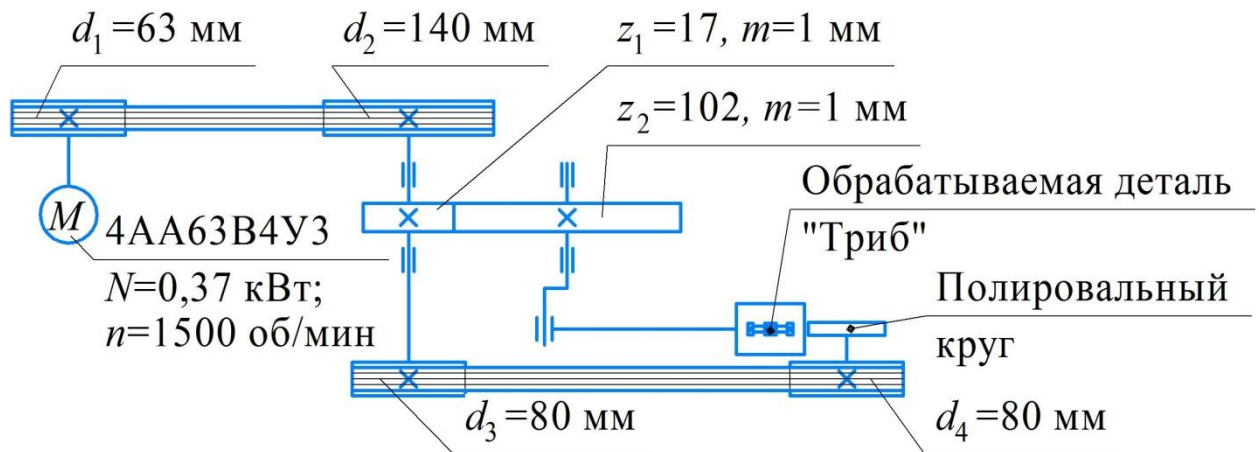


Рисунок 2.9 – Кинематическая схема  
специального зубополировального станка

### 2.5 Силовой расчет станка

#### Расчет приводного вала шпинделя.

Исходные данные:

- силы, действующие на вал от косозубой цилиндрической передачи:  
окружная  $F_t = 406,27$  Н (действует в вертикальной плоскости); радиальная  $F_r = 147,87$  Н (действуют в горизонтальной плоскости);
- вращающий момент на валу  $T = 4,9$  Н · м;
- частота вращения вала  $n = 682$  мин<sup>-1</sup>;
- диаметр делительной окружности зубчатого колеса, установленного на валу  $d_2 = 153$  мм;
- требуемый ресурс  $L_h = 9000$  ч;

- диаметр вала под подшипники  $d_n = 15$  мм;
- диаметр вала под колесо  $d_k = 20$  мм;
- расстояние между опорами вала, координаты точек приложения сил определяются по компоновки:  $a = 26$  мм;  $b = 158$  мм;  $c = 23,5$  мм.

Выходной вал соединён с приводным валом ременной передачей.

Последовательность расчёта:

1) Определяем радиальную силу от ременной передачи, действующую на консольный участок вала по формуле [4]:

$$F_p = \frac{F_{tp} \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2}}{\psi} \approx \frac{0,95 F_{tp}}{\psi},$$

где  $F_{tp} = \frac{2000 T}{d_{шк}}$  – окружная сила на шкиве;

$d_{шк}$  – диаметр шкива;

$\alpha_1$  – угол обхвата на малом шкиве;

$\psi=0,7$  – для клиноременной передачи.

$$F_{tp} = \frac{2000 \cdot 4,9}{140} = 70 \text{ Н},$$

$$F_p = \frac{0,95 \cdot 70}{0,7} = 95 \text{ Н}.$$

2) Составляем расчётную схему вала (рисунок 2.10, а).

3) Определяем опорные реакции в горизонтальной плоскости (рисунок 2.10, б):

$$\sum M_A = 0; F_r a - R_{BX}(a + b) = 0,$$

откуда,

$$R_{BX} = \frac{F_r a}{a + b} = \frac{147,87 \cdot 0,026}{0,026 + 0,158} = 20,89 \text{ Н};$$

$$\sum M_B = 0; R_{AX}(a + b) - F_r b + F_a \frac{d_2}{2} = 0,$$

откуда,

$$R_{AX} = \frac{F_r b}{a + b} = \frac{147,87 \cdot 0,158}{0,026 + 0,158} = 126,98 \text{ Н.}$$

Проверка правильности определения реакций:

$$\sum F_X = 0; R_{AX} - F_r + R_{BX} = 20,89 - 147,87 + 126,98 = 0.$$

4) Определяем опорные реакции в вертикальной плоскости (рисунок 2.10, в):

$$\sum M_A = 0; F_t a - R_{BY}(a + b) = 0,$$

откуда,

$$R_{BY} = \frac{F_t a}{(a + b)} = \frac{406,27 \cdot 0,026}{0,026 + 0,158} = 57,41 \text{ Н;}$$

$$\sum M_B = 0; R_{AY}(a + b) - F_t b = 0,$$

откуда,

$$R_{AY} = \frac{F_t b}{(a + b)} = \frac{406,27 \cdot 0,158}{0,026 + 0,158} = 348,86 \text{ Н.}$$

$$\sum F_Y = 0; -R_{AY} + F_t - R_{BY} = -348,86 + 406,27 - 57,41 = 0.$$

5) Определяем опорные реакции от силы  $F_p$  (рисунок 2.10, з):

$$\sum M_A = 0; R_{BM}(a + b) - F_p(a + b + c) = 0,$$

откуда,

$$R_{Bp} = \frac{F_p(a + b + c)}{a + b} = \frac{95 \cdot (0,026 + 0,158 + 0,0235)}{0,026 + 0,158} = 107,13 \text{ Н;}$$

$$\sum M_B = 0; R_{Ap}(a + b) - F_p c = 0,$$

откуда,

$$R_{Ap} = \frac{F_p c}{a + b} = \frac{95 \cdot 0,0235}{0,026 + 0,158} = 12,13 \text{ Н.}$$

Проверка правильности определения реакций:

$$\sum F_Y = 0; -R_{Ap} + R_{Bp} - F_p = -12,13 + 107,13 - 95 = 0.$$

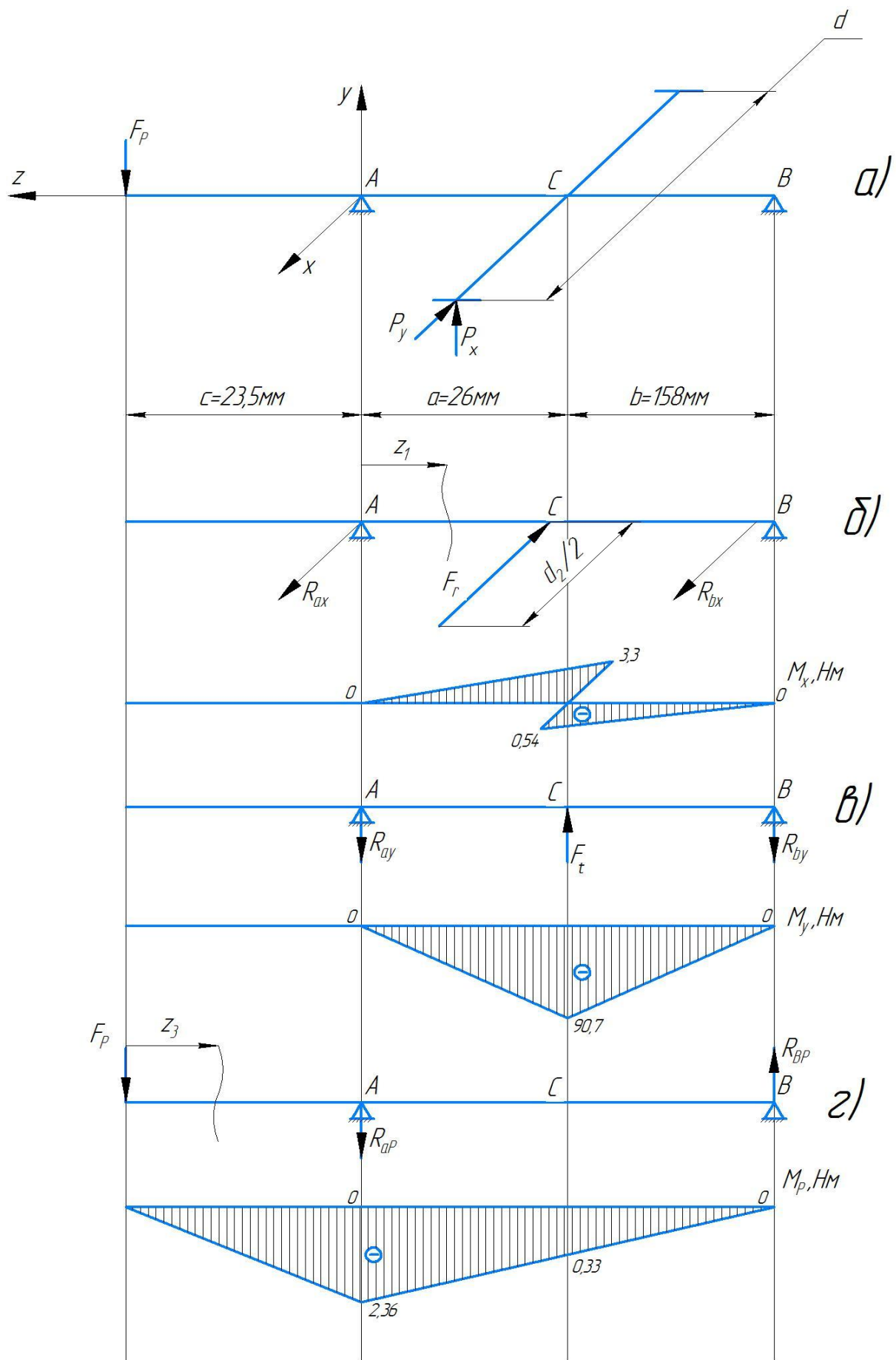


Рисунок 2.10 – Расчётная схема вала и эпюры изгибающих моментов

6) Суммарные реакции в опорах:

$$R_A = \sqrt{R_{AX}^2 + R_{AY}^2} + R_{Ap} = \sqrt{126,98^2 + 348,86^2} + 12,13 = 384,08 \text{ Н};$$

$$R_B = \sqrt{R_{BX}^2 + R_{BY}^2} + R_{Bp} = \sqrt{20,89^2 + 57,41^2} + 107,13 = 174,35 \text{ Н}.$$

7) Изгибающие моменты:

– в горизонтальной плоскости (см. рисунок 2.10, б):

$$M_{z_1}^X = -R_{AX}z_1 \quad (0 \leq z_1 \leq a);$$

$$M_{z_1=0}^X = 0; \quad M_{z_1=a}^X = -R_{AX}a = 126,98 \cdot 0,026 = 3,3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{z_2}^X = -R_{BX}z_2 \quad (0 \leq z_2 \leq b);$$

$$M_{z_2=0}^X = 0; \quad M_{z_2=b}^X = -R_{BX}b = -20,89 \cdot 0,026 = -0,54 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– в вертикальной плоскости (см. рисунок 2.10, в):

$$M_{z_3}^Y = -R_{AY}z_3 \quad (0 \leq z_3 \leq a);$$

$$M_{z_3=0}^Y = 0; \quad M_{z_3=a}^Y = -R_{AY}a = -348,86 \cdot 0,26 = -90,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– изгибающие моменты от силы  $F_p$  (см. рисунок 2.10, г):

$$M_{z_4}^p = -F_p z_4 \quad (0 \leq z_4 \leq c);$$

$$M_{z_4=0}^p = 0; \quad M_{z_4=c}^p = -F_p c = -107,13 \cdot 0,0235 = -2,36 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– изгибающий момент в сечении C (под колесом):

$$M_C^M = -R_{Ap}a = -12,13 \cdot 0,026 = -0,33 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8) Суммарный изгибающий момент в сечении под колесом:

$$M_C = \sqrt{(M_C^X)^2 + (M_C^Y)^2} + M_C^p = \sqrt{3,3^2 + 90,7^2} + (-0,33) = 90,43 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9) Принимаем материал вала – сталь 45 [4]:

$$\sigma_B = 560 \text{ МПа}, \sigma_{-1} = 280 \text{ МПа}, \tau_{-1} = 170 \text{ МПа}, \psi_\sigma = 0, \psi_\tau = 0;$$

механическая обработка вала – тонкая обточка; вал не подвергается поверхностному упрочнению.

10) Расчёт на сопротивление усталости.

Для опасного сечения вала (сечение C) расчётный коэффициент запаса прочности определяется по формуле [4], а коэффициенты  $S_\sigma$  и  $S_\tau$  – по формулам [4]:

$$S = \frac{S_{\sigma} S_{\tau}}{\sqrt{S_{\sigma}^2 + S_{\tau}^2}} \geq [S] = 1,5 \dots 2,5 ;$$

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1} K_L}{K_{\sigma D} \sigma_a}, S_{\tau} = \frac{\tau_{-1} K_L}{K_{\tau D} \tau_a}, \text{ так как } \psi_{\sigma} = 0, \psi_{\tau} = 0.$$

Коэффициент долговечности:

$$K_L = \sqrt[9]{\frac{4 \cdot 10^6}{N_{FE}}},$$

так как  $N_{FE} > 4 \cdot 10^6$ , то  $K_L = 1$ .

Суммарные коэффициенты  $K_{\sigma D}$  и  $K_{\tau D}$  определяются по формулам [4]:

$$K_{\sigma D} = \left( \frac{K_{\sigma}}{K_d} + K_F - 1 \right) \frac{1}{K_V}; \quad K_{\tau D} = \left( \frac{K_{\tau}}{K_d} + K_F - 1 \right) \frac{1}{K_V}.$$

Для этих концентраторов по таблицам 6.3 [4] и 6.4 [4] находим значения  $K_{\sigma}$  и  $K_{\tau}$ :

– для ступенчатого перехода с галтелью ( $d_k = 20$  мм,  $t = 2,5$  мм,  $r = 1,5$  мм приняты по табл. 6.5 [4]):

$$\text{при } \frac{r}{d_k} = \frac{1,5}{20} = 0,075; \quad \frac{t}{r} = \frac{2,5}{1,5} = 1,6 ; \text{ и } \sigma_B = 560 \text{ МПа, } K_{\sigma} = 1,6; K_{\tau} = 1,42;$$

– для шпоночной канавки, выполненной пальцевой фрезой  $K_{\sigma} = 1,57; K_{\tau} = 1,54$ .

Следовательно, большее влияние на прочность вала оказывает ступенчатый переход с галтелью  $r = 1,5$  мм; поэтому для расчёта принимаем  $K_{\sigma} = 1,82; K_{\tau} = 1,57$ .

По таблице 6.6 [4]  $K_d = 0,82$ ; по таблице 6.7 [4] –  $K_F = 1,08$ ; коэффициент  $K_V = 1$ , так как вал не подвергается поверхностному упрочнению.

Тогда,

$$K_{\sigma D} = \left( \frac{1,6}{0,92} + 1,08 - 1 \right) \cdot \frac{1}{1} = 1,82;$$

$$K_{\tau D} = \left( \frac{1,42}{0,92} + 1,08 - 1 \right) \cdot \frac{1}{1} = 1,62.$$

$$\sigma_a = \frac{10^3 M_c}{W_{\text{И}}};$$

$$\tau_a = \frac{10^3 T}{2W_P},$$

где моменты сопротивления  $W_{\text{И}}$  и  $W_P$  [4]:

$$W_{\text{И}} = \frac{\pi d_{\text{к}}^3}{32} = \frac{3,14 \cdot 20^3}{32} = 785 \text{ мм}^3;$$

$$W_P = \frac{\pi d_{\text{к}}^3}{16} = \frac{3,14 \cdot 20^3}{16} = 1570 \text{ мм}^3;$$

следовательно,

$$\sigma_a = \frac{10^3 \cdot 90,7}{785} = 115,54 \text{ МПа};$$

$$\tau_a = \frac{10^3 \cdot 5,18}{2 \cdot 1570} = 28,88 \text{ МПа}.$$

Тогда,

$$S_{\sigma} = \frac{380 \cdot 1}{1,82 \cdot 115,54} = 1,8;$$

$$S_{\tau} = \frac{230 \cdot 1}{1,62 \cdot 28,88} = 4,91;$$

$$S = \frac{1,8 \cdot 4,91}{\sqrt{1,8^2 + 4,91^2}} = 1,69 > [S] = 1,5 \dots 2,5.$$

Следовательно, вал удовлетворяет условию прочности по сопротивлению усталости.

Выбор подшипников качения.

Исходные данные:

$d = 15 \text{ мм}$  – диаметр опорной части вала;

$F_{r1} = R_A = 384,08 \text{ Н}$ ,  $F_{r2} = R_B = 174,35 \text{ Н}$  – радиальные нагрузки действующие на вал;

$n = 682 \text{ мин}^{-1}$  – частота вращения внутреннего кольца подшипника;

$L_h = 9000 \text{ ч}$  – требуемый ресурс подшипника;

Выбираем предварительно [4] шарикоподшипники лёгкой серии 202, у которого динамическая радиальная грузоподъёмность  $C_r = 7750 \text{ Н}$ , а статическая радиальная грузоподъёмность  $C_{or} = 3600 \text{ Н}$ ;  $d \times D \times B = 15 \times 35 \times 11 \text{ мм}$  (рисунок 2.11).

Определяем эквивалентную динамическую нагрузку [4]:

$$P_{ri} = (VX_i F_{ri} + Y_i F_{ai}) K_6 \cdot K_T \cdot \sqrt[P]{\alpha_1 + \alpha_2 \beta_1^P + \alpha_3 \beta_2^P};$$

где  $i$  – номер опоры ( $i = 1, 2$ );

$V$  – коэффициент вращения ( $V = 1$  при вращении внутреннего кольца подшипника);

$F_{ri}$  – радиальная нагрузка действующая на подшипник, Н;

$F_{ai}$  – осевая нагрузка, действующая на подшипник, Н;

$X_i, Y_i$  – коэффициенты, учитывающие разное повреждающее действие радиальной и осевой нагрузок;

$K_6$  – коэффициент безопасности, учитывающий характера нагрузки;  $K_6 = 1,3 \dots 1,5$  – для редукторов, принимаем  $K_6 = 1,4$ ;

$K_T$  – коэффициент, учитывающий температуру подшипникового узла; при температуре  $\leq 100^\circ\text{C}$   $K_T = 1$ ;

$P$  – показатель степени (для шариковых подшипников  $P = 3$ ).

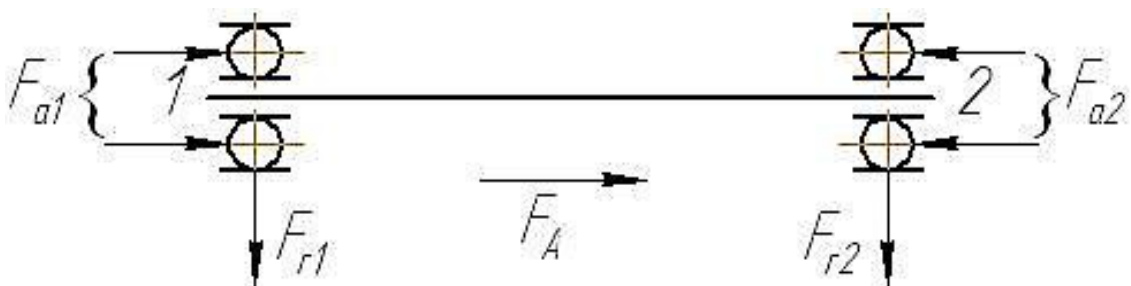


Рисунок 2.11 – Схема установки шариковых подшипников

Тогда,

$$P_{r1} = (1 \cdot 1 \cdot 384,08 + 0 \cdot 0) \cdot 1,4 \cdot 1 = 537,71 \text{ Н.}$$

$$P_{r2} = (1 \cdot 1 \cdot 174,35 + 0 \cdot 0) \cdot 1,4 \cdot 1 = 244,09 \text{ Н.}$$

Дальнейший расчёт ведём по более нагруженной опоре 1.

Ресурс подшипника [4]:

$$L_h = \frac{10^6}{60n} L \geq L_{h\text{тр}},$$

где  $n$  – частота вращения кольца,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$L$  – ресурс подшипника, млн оборотов.

$$L = a_1 a_{23} (C_r / P_r)^P,$$

где  $a_1$  – коэффициент долговечности,  $a_1 = 1$  [4];

$a_{23}$  – коэффициент, учитывающий качество металла деталей подшипника и условия эксплуатации.

Тогда,

$$L = 1 \cdot 0,75 \cdot (32000 / 534,71)^3 = 2245,54 \text{ млн оборотов.}$$

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot 682} \cdot 2245,54 = 54876,34 \text{ ч} > L_{h\text{тр}} = 9000 \text{ ч.}$$

Принимаем подшипник 202 серии.

Проверка на отсутствие остаточных деформаций в зоне контакта тел качения с кольцами проводится по условию [4]:

$$P_{or} \leq C_{or},$$

где  $P_{or}$  – эквивалентная статическая радиальная нагрузка, Н;

$C_{or}$  – статическая радиальная грузоподъемность, Н.

При совместном действии на подшипник радиальной  $F_r$  и осевой  $F_a$  нагрузок эквивалентная статическая нагрузка определяется как наибольшее значение из двух [4]:

$$P_{or} = X_0 F_r + Y_0 F_a,$$

где  $X_0, Y_0$  – коэффициенты радиальной и осевой статических нагрузок соответственно, таблица 7.2 [4].

Выбираем  $X_0 = 0,6$ ;  $Y_0 = 0,5$ .

Тогда,

$$P_{or} = 0,6 \cdot 3419,98 + 0,5 \cdot 566,72 = 2335,35 \text{ Н} < F_{r2} = 3419,98 \text{ Н}.$$

Следовательно, принимаем:

$$P_{or} = F_{r2} = 3419,98 \text{ Н} < C_{or} = 32000 \text{ Н}.$$

Подшипник пригоден.

## 2.6 Динамический расчет станка

При работе станка привод нагружен крутящим моментом в основном от сил резания. В процессе резания из-за переменности припуска неоднородности структуры материала и ряда других причин на шпинделе возникает переменная нагрузка и, как следствие этого, переменный крутящий момент в приводе. Интенсивные крутильные колебания шпинделя могут привести к возникновению его изгибных колебаний и снижению качества обработки. Кроме того, возможны резонансные явления, которые снижают производительность станка и могут привести к выходу его из строя.

Вибрации, генерируемые приводом главного движения, обусловлены циклическими погрешностями зубчатых передач и погрешностями профиля зубьев. Возмущения от ременного привода вызваны биением валов и шкивов, разбросом упругих свойств ремня и отклонениями профиля его поперечного сечения по длине. Вибровозмущения, вызванные асинхронным электродвигателем являются следствием эксцентричного расположения ротора относительно статора относительно оси вала [12].

### Разработка расчетных схем.

Для определения динамических характеристик привода прежде всего составляют расчетные схемы, учитывающие моменты инерции вращающихся элементов привода и податливость связей между ними по цепи передачи от электродвигателя к шпинделю.

Для определения момента инерции полировального круга, необходимо «привести» его к детали простой формы, момент инерции которой определяется по классической формуле:

$$J = \frac{\rho}{g} \cdot \frac{\pi}{32} \cdot l d^4$$

где  $\rho$  – удельный вес материала детали, Н/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g=9,8$ , м/с<sup>2</sup>;

$l, d$  – длина и диаметр вращающихся деталей, м.

При определении моментов инерции роторов электродвигателей, муфт и т.д. необходимо использовать соответствующие каталоги, рассчитывая момент инерции по маховому  $GD^2$ :

$$J = 0,25 \cdot G \cdot D^2,$$

где  $G$  – вес ротора, Н;

$D$  – диаметр ротора, м.

$$J = 0,25 \cdot 0,08 \cdot 0,07^2 = 0,0014 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции II вала, диаметром 20 мм и длиной 300 мм равен:

$$J = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,3 \cdot 0,02^4 = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

Момент инерции III вала, диаметром 15 мм и длиной 150 мм равен:

$$J = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,15 \cdot 0,015^4 = 5,9 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

Далее выполним подробный расчет каждого участка вала.

Моменты инерции участков для II вала:

для участков  $d=15$  мм:

$$J_{11} = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,019 \cdot 0,015^4 = 7,52 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

для участков  $d=16$  мм:

$$J_{12} = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,035 \cdot 0,016^4 = 1,79 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

для участков  $d=17$  мм:

$$J_{13} = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,1445 \cdot 0,017^4 = 9,43 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

для участков  $d=20$  мм:

$$J_{14} = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,0045 \cdot 0,02^4 = 5,63 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

Суммарный момент инерции для (I) вала.

$$J_1 = 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Моменты инерции участков для шпинделя:

для участков  $d=16$  мм:

$$J_{21} = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,035 \cdot 0,016^4 = 1,79 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

для участков  $d=22$  мм:

$$J_{22} = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,009 \cdot 0,022^4 = 1,64 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

для участков  $d=13$  мм:

$$J_{23} = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,007 \cdot 0,013^4 = 1,56 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

для участков  $d=17,9$  мм:

$$J_{24} = \frac{7800}{9,8} \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 0,019 \cdot 0,0179^4 = 1,52 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

Суммарный момент инерции для шпинделя:

$$J_2 = 6,51 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Определяем податливость валов при кручении:

$$e = \frac{32}{\pi G} \cdot \frac{l}{D^4},$$

$$e_1 = \frac{32}{3,14 \cdot 8,5 \cdot 10^9} \cdot \frac{0,24}{0,017^4} = 0,034 \text{ рад/Н} \cdot \text{м},$$

$$e_2 = \frac{32}{3,14 \cdot 8,5 \cdot 10^9} \cdot \frac{0,154}{0,022^4} = 0,079 \text{ рад/Н} \cdot \text{м}.$$

Податливость механической части привода:

$$e_m = \frac{e_1 \Sigma J_{J_1} + (e_1 + e_2) \cdot \Sigma J_{J_2}}{J_3},$$

откуда,

$$J_3 = \frac{J_2}{(1/2)^2} + J_1,$$

$$J_3 = \frac{6,51 \cdot 10^{-7}}{(1/2)^2} + 2,3 \cdot 10^{-7} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$e_m = \frac{0,034 \cdot 2,3 \cdot 10^{-7} + (0,034 + 0,0072) \cdot 6,51 \cdot 10^{-7}}{4,9 \cdot 10^{-7}} = 0,0071 \text{ рад/Н} \cdot \text{м}.$$

На рисунке 2.12 представлена расчетная схема приведенной динамической системы привода.

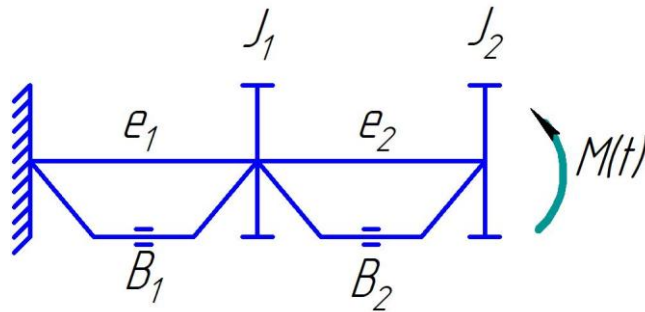


Рисунок 2.12 – Расчетная схема приведенной динамической системы привода

На рисунках 2.13 и 2.14 представлены ступенчатая эквивалентная расчетная и линейная эквивалентная схемы.

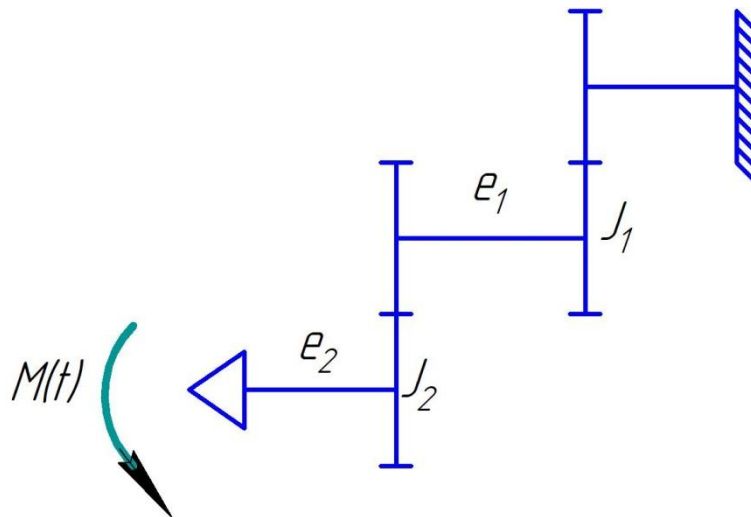


Рисунок 2.13 – Структурная эквивалентная расчетная схема привода

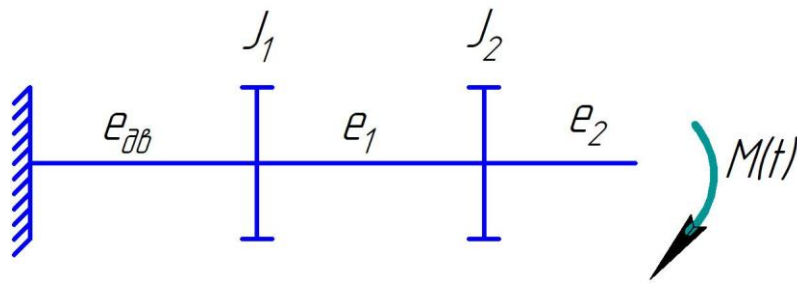


Рисунок 2.14 – Динамическая эквивалентная схема привода

Определяем собственную частоту системы:

$$\omega^2 = \frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2} \cdot \frac{1}{e_2},$$

$$\omega^2 = \frac{2,3 \cdot 10^{-7} + 6,51 \cdot 10^{-7}}{2,3 \cdot 10^{-7} \cdot 6,51 \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{1}{0,0079} = 58,81 \cdot 10^6 \text{ Гц.}$$

Максимальный угол закручивания для II вала:

$$\theta_{II \max} = \frac{T_2}{J_1 \cdot \omega^2},$$

где  $T_1$  – крутящий момент на II валу,  $T_2=4,9$  Нм,

$$\theta_{II \max} = \frac{4,9}{2,3 \cdot 10^{-7} \cdot 58,81 \cdot 10^6} = 0,362^\circ$$

$$\theta_{II \max} = \frac{T_2}{J_1 \cdot \omega^2},$$

где  $T_{III}$  – крутящий момент на шпинделе,  $T_{III}=4,62$  Н·м,

$$\theta_{III \max} = \frac{4,62}{6,51 \cdot 10^{-7} \cdot 58,81 \cdot 10^6} = 0,128^\circ.$$

Максимальный динамический момент на II валу:

$$M_{\max} = \frac{1}{e_1} \cdot \theta_{II \max},$$

$$M_{II \max} = \frac{1}{0,034} \cdot 0,362 = 10,64 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Максимальный динамический момент на шпинделе:

$$M_{III \max} = \frac{1}{e_2} \cdot \theta_{III \max},$$

$$M_{III \max} = \frac{1}{0,0079} \cdot 0,128 = 16,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Следовательно, максимальный динамический момент привода принимаем  $M_{\max}=16,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

## 2.7 Проектирование полировального круга

При полировании зубьев трибов, используют полировальники из твердых пород древесины или мягких цветных металлов. В связи с тем, что завод-изготовитель имеет поставщиков заготовок из бука и дуба, было принято решение о проектировании полировального круга из этих материалов.

Заготовки древесины имеют диаметр 155 мм, следовательно, диаметр полировальника принимается не более 150 мм. Для обеспечения полного перекрытия детали Триб, диаметр вершин которого равен 10,75 мм, ширину круга принимаем равной 20 мм.

Для создания формообразующего движения  $\Phi_V(B_2)$ , описанное в главе 2.1, принято решение предусмотреть наличие винтовой канавки на полировальном круге. Таким образом, полировальный круг будет представлять собой однозаходный червяк с шагом винтовой канавки, равным шагу зубьев обрабатываемого триба.

Ниже представлен расчет геометрических параметров полировального круга.

Передаточное отношение воспроизводимой передачи:

$$u = \frac{z_1}{z_2},$$

где  $z_1$  – число заходов полировальника,  $z_1=1$ ;

$z_2$  – число зубьев триба,  $z_2=64$ ,

$$u = \frac{1}{64} = 0,015.$$

Следовательно, за один оборот полировального круга, триб должен совершить 64 оборота, что позволит обработать все зубья триба.

Определяем коэффициент  $q$  диаметра полировального круга:

$$q = \frac{d}{m},$$

где  $d$  – делительный диаметр полировального круга,

$$d = D_{\text{кр}} - 2 \cdot m = 150 - 2 \cdot 0,162 = 149,68 \text{ мм};$$

$m$  – модуль зубьев, равен модулю обрабатываемого триба,  $m=0,162$  мм.

$$q = \frac{149,68}{0,162} = 923,95.$$

Определяем делительный угол подъема канавки полировального круга:

$$\gamma = \arctg \frac{k_1}{q},$$

отсюда,  $k_1$  – число витков канавки на полировальном круге,

$$k_1 = \frac{b}{p},$$

где  $b$  – ширина полировального круга,  $b=20$  мм;

$p$  – шаг зубьев, равен шагу зубьев триба,  $p=0,527$  мм.

Следовательно,

$$k_1 = \frac{20}{0,527} = 37,95.$$

Отсюда,

$$\gamma = \arctg \frac{37,95}{923,95} = 2,35^\circ.$$

Определяем диаметр вершин полировального круга:

$$d_{a1} = m(q + 2),$$

$$d_{a1} = 0,162(923,95 + 2) = 150,004 \text{ мм}.$$

Принимаем  $d_{a1}=150$  мм.

Определяем диаметр впадин витков полировального круга:

$$d_{f1} = m(q - 2,4),$$

$$d_{f1} = 0,162 \cdot (923,95 - 2,4) = 149,29 \text{ мм.}$$

Для обработки трибов обычного исполнения, решено использовать в качестве материала – бук, а экспортного – дуб.

Масса полировального круга (определена в результате трехмерного моделирования в CAD-программе SolidWorks)  $m_{\text{кр}}=0,385$  кг.

## 2.8 Расчет противовеса станка

Полирование производится в два этапа: получистовое и чистовое.

При получистовом полировании, обработка производится без противовеса.

Схема сил, действующих при получистовом полировании, представлена на рисунке 2.15.

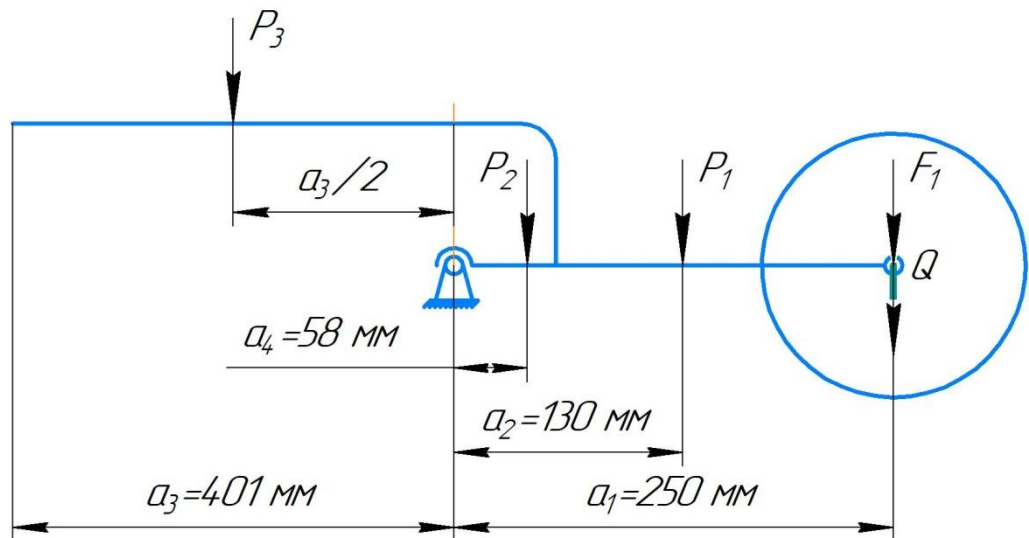


Рисунок 2.15 – Схема сил при получистовом полировании

Усилие при получистовом полировании  $Q$  будет равно:

$$Q = F_1 \cdot a_1 + P_1 \cdot a_2 + P_2 \cdot a_4 - P_3 \cdot \frac{a_3}{2}$$

где  $F_1$  – сила, действующая от массы шпиндельного узла и полировального круга,

$$F_1 = (m_{кр} + m_{шп} + m_{шк} + m_k + m_{тол} \cdot 2 + m_{г} + m_{ш} + m_{вт} \cdot 2 + m_{кт} \cdot 2) \cdot g$$

$m_{кр}$  – масса полировального круга с зажимными шайбами, кг;

$m_{шп}$  – масса шпинделя, кг;

$m_{шк}$  – масса шкива, кг;

$m_k$  – масса кольца, кг;

$m_{тол}$  – масса тавотницы шпиндельного узла, кг;

$m_{г}$  – масса гайки М12, кг;

$m_{ш}$  – масса шайбы, кг;

$m_{в}$  – масса втулки, кг;

$m_{кт}$  – масса крышки, кг;

$g$  – ускорение свободного падения.

В результате трехмерного моделирования в CAD-программе SolidWorks:  $m_{кр} = 0,75$  кг;  $m_{шп} = 0,21$  кг;  $m_{шк} = 0,43$  кг;  $m_{тол} = 0,03$  кг;  $m_{в} = 0,04$  кг;  $m_k = 0,016$  кг;  $m_{кт} = 0,006$  кг;  $m_{г} = 0,02$  кг;  $m_{ш} = 0,025$  кг.

Тогда,

$$F_1 = (0,75 + 0,21 + 0,43 + 0,016 + 0,03 \cdot 2 + 0,02 + 0,025 + 0,04 \cdot 2 + 0,006 \cdot 2) \cdot 9,8 = 15,7 \text{ Н};$$

$P_1$  – сила, действующая от массы натяжного ролика и хобота:

$$P_1 = (m_{хоб} + m_{хом} + m_p) \cdot g,$$

где  $m_{хом}$  – масса хомута, кг;

$m_{хоб}$  – масса хобота, кг;

$m_p$  – масса ролика, кг.

В результате трехмерного моделирования в CAD-программе SolidWorks:  $m_{хом} = 0,11$  кг;  $m_{хоб} = 1,77$  кг, следовательно,

$$P_1 = (1,77 + 0,065 + 0,11) \cdot 9,8 = 19,06 \text{ Н};$$

$P_2$  – сила, действующая от массы кронштейна, на котором закреплен противовес:

$$P_2 = (m_{пл} + m_{кр} + m_m) \cdot g,$$

где  $m_{пл}$  – масса пластины, кг;

$m_{кр}$  – масса кронштейна, кг;

$m_{м}$  – масса метизов, кг.

В результате трехмерного моделирования в CAD-программе SolidWorks:  $m_{пл} = 0,3$  кг;  $m_{кр} = 0,25$  кг;  $m_{м} = 0,329$  кг, следовательно,

$$P_2 = (0,3 + 0,25 + 0,329) \cdot 9,8 = 8,62 \text{ Н};$$

$P_3$  – сила, действующая от массы кронштейна, на котором закреплен противовес с левой стороны от опоры:

$$P_3 = m_{кр} \cdot g,$$

где  $m_{кр}$  – масса кронштейна, кг;  $m_{кр} = 0,43$  кг,

$$P_3 = 0,43 \cdot 9,8 = 4,24 \text{ Н}.$$

Тогда,

$$Q = 15,7 \cdot 0,25 + 19,06 \cdot 0,13 + 8,62 \cdot 0,058 - 4,24 \cdot 0,4 / 2 = 6,05 \text{ Н}.$$

Для обеспечения требуемых режимов резания чистового полирования необходимо в конструкции предусмотреть противовес.

Ниже представлен расчет по определению расстояния установки противовеса на кронштейне.

Для расчета расстояния установки противовеса, необходимо составить схему закрепления груза, учитывая возможность его снятия, для обеспечения режимов резания при получистовом полировании.

Схема сил, действующих при чистовом полировании, представлена на рисунке 2.16.

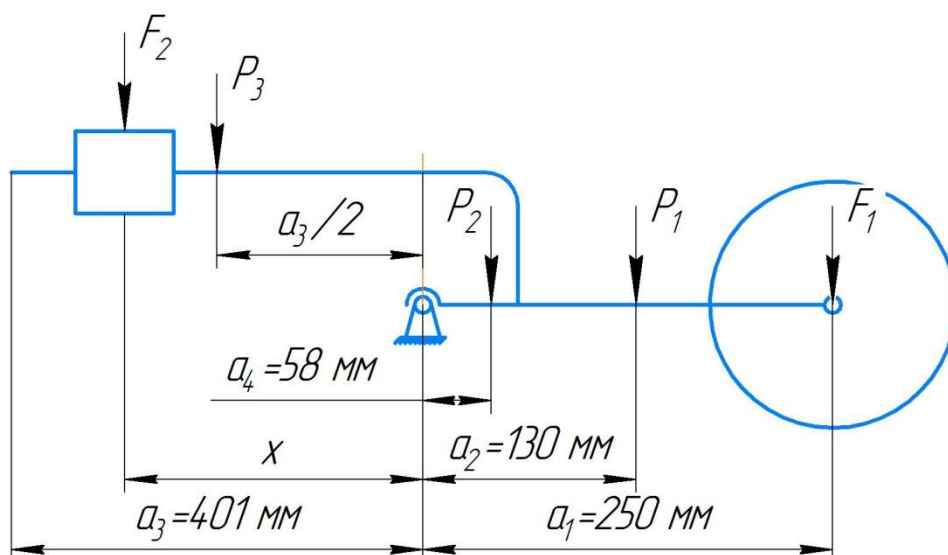


Рисунок 2.16 – Схема сил при чистовом полировании

Тогда, уравнение равновесия будет иметь вид:

$$P_3 \cdot \frac{a_3}{2} + F_2 \cdot x = F_1 \cdot a_1 + P_1 \cdot a_2 + P_2 \cdot a_4,$$

где  $F_2$  – сила, действующая от массы противовеса,

$$F_2 = m_{\text{пв}} \cdot g,$$

где  $m_{\text{пв}}$  – масса противовеса, кг;

следовательно,

$$F_2 = 1,47 \cdot 9,8 = 14,4 \text{ Н.}$$

Тогда, уравнение равновесия имеет вид:

$$4,24 \cdot 0,4 / 2 + 14,4 \cdot x = 15,7 \cdot 0,25 + 19,06 \cdot 0,13 + 8,62 \cdot 0,058,$$

$$14,4 \cdot x = 4,78,$$

$$x = \frac{4,78}{14,4} = 0,332 \text{ м.}$$

Таким образом, для обеспечения чистового режима резания, противовес должен находиться на расстоянии 332 мм от оси коленчатого вала.

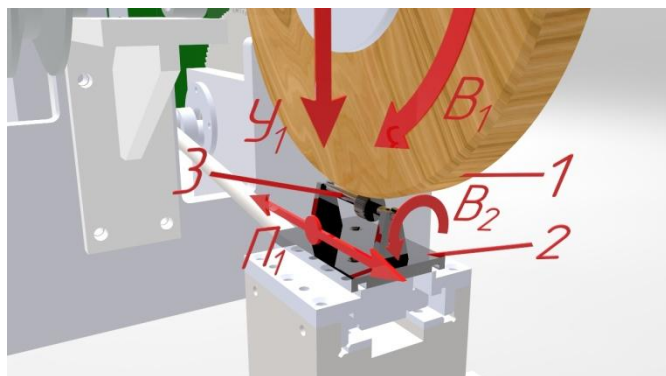
### 3 РАЗРАБОТКА ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ СБОРКИ СТАНКА И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

В главе представлены результаты проектирования конструкции специального зубополировального станка в CAD-программе SolidWorks. Станок предназначен для обработки поверхностей зубьев детали «Триб» часового механизма скоростемера локомотива.

Во время проектирования станка была проанализирована обрабатываемая деталь (рисунок 3.1, *а*), определены необходимые движения формообразования (рисунок 3.1, *б*), проведены кинематический и силовой расчеты приводов движения.



*а)*



*б)*

Рисунок 3.1 – Обрабатываемая деталь (*а*)  
и схема полирования триба (*б*)

Трехмерное компьютерное моделирование конструкции станка выполнялось в CAD-программе SolidWorks.

Программный комплекс SolidWorks идеально подходит для решения задач современного проектирования оборудования. Благодаря своей открытой структуре и множеству приложений SolidWorks охватывает весь процесс проектирования – от создания модели конструкции до разработки управляющей программы для станка с ЧПУ. При этом передача данных между CAD-, CAE- и CAM-системами происходит напрямую, без применения сторонних форматов, что значительно упрощает и ускоряет процесс проектирования и, как следствие, производства в целом.

Используя имеющиеся данные, проведенные теоретические расчеты элементов конструкции, были выполнены трехмерные модели деталей проектируемого станка. В процессе моделирования применялись технологии сопряжения деталей (сборки), позволяющие выявлять геометрические неточности на этапе проектирования. Также, с помощью приложения SolidWorks Simulation, методом конечных элементов были выполнены расчеты на прочность и жесткость конструкции станка. Таким образом, возможности CAD-, CAE-систем «максимально» предотвращают ошибки, появляющиеся при изготовлении или сборки конструкций по чертежам без использования компьютерного моделирования [13, 18].

На рисунке 3.2 представлена трехмерная твердотельная сборка спроектированного специального зубополировального станка в CAD-программе SolidWorks. Станок выполнен в настольном исполнении.

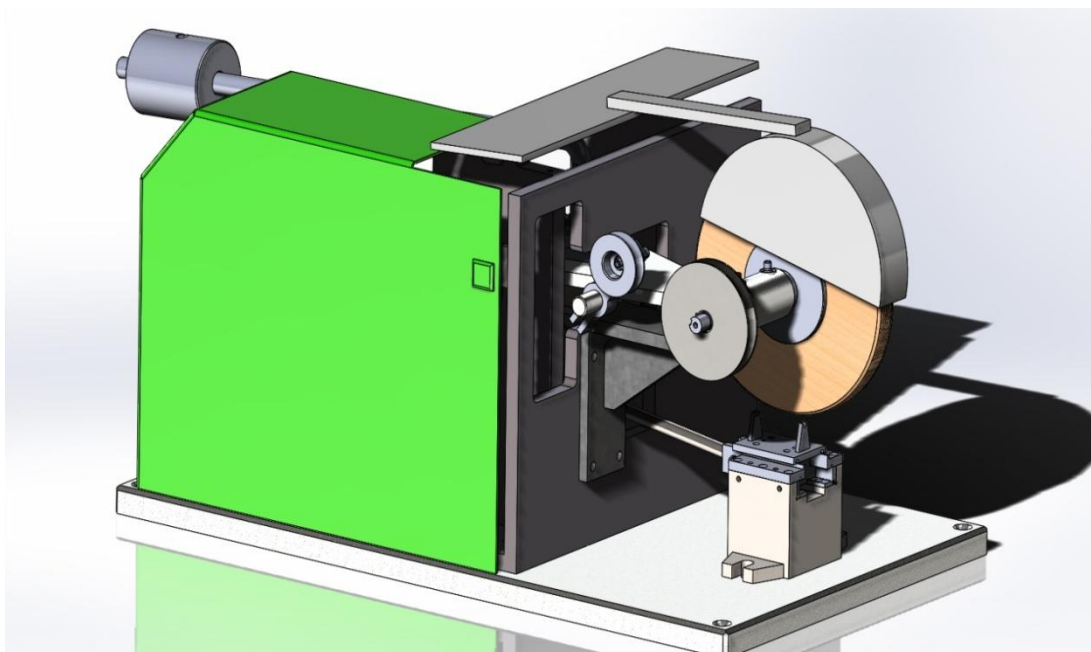
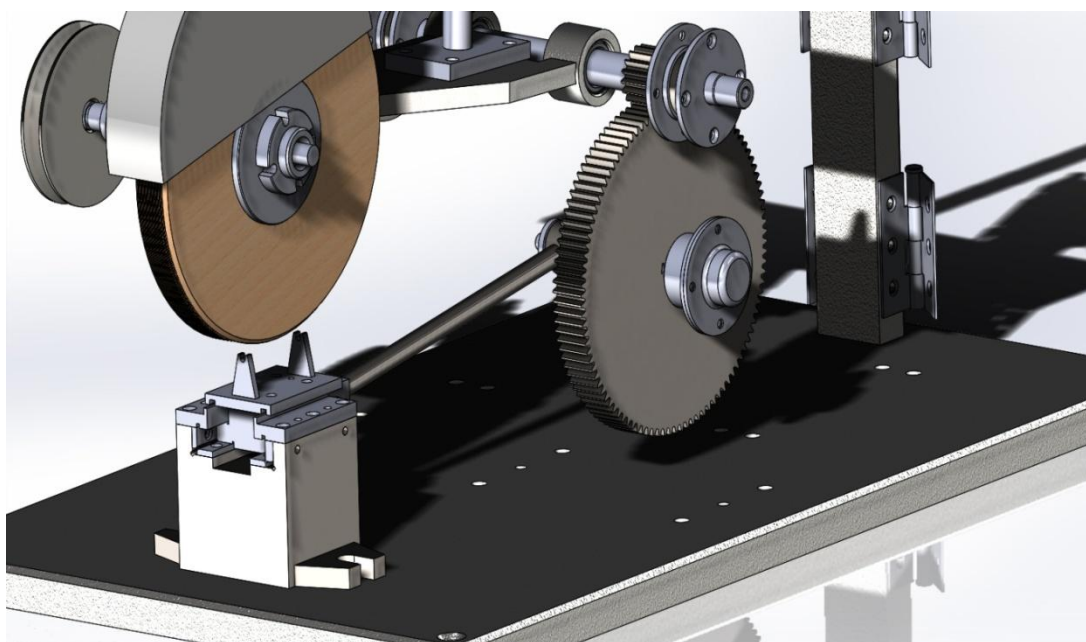


Рисунок 3.2 – Трехмерная твердотельная сборка  
спроектированного специального зубополировального станка  
в CAD-программе SolidWorks

Принцип работы станка заключается в следующем (см. рисунки 3.1, 3.2). Полирование производится полировальным кругом 1 с винтовой профильной канавкой по периферии, закрепленным на шпинделе станка, который получает вращательное движение ( $B_1$ ) от двигателя через ременные

передачи. Шпиндель крепится на качающейся раме, положение которого регулируется противовесом ( $U_1$ ). В процессе обработки на станке должна осуществляться подмазка круга абразивной пастой. Таким образом, полировальный круг представляет собой абразивный червяк с шагом, равным шагу зубьев полируемого триба, свободно устанавливаемого своими цапфами в углубление подушек специального приспособления закрепленного на суппорте 2. Вращаясь, полировальный круг, заставляет вращаться триб ( $B_2$ ) за счет винтовой канавки. Суппорт при этом совершает возвратно-поступательное движение ( $П_1$ ) с помощью коленчатого вала, преобразованное от двигателя через ременную и зубчатую передачи. То есть происходит полирование зубьев методом обкатки.

Таким образом, применение CAD-, CAE-систем при проектировании любого технологического оборудования помогают не только ускорить переход от расчетов к составлению конструкторской документации, благодаря стандартным библиотекам и системам автоматизированного составления конструкторской документации, но и создают огромную базу для проведения инженерных расчетов и автоматизированного внесения изменений в конструкцию.

Для оценки соответствия ответственных элементов конструкции проектируемого станка критериям работоспособности необходимо выполнить анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) методом конечных элементов (МКЭ).

НДС деталей элементов конструкции (соединения/сборки) определяется методом перемещений и известными зависимостями между напряжением и деформациями.

Перемещения узловых точек элемента, согласно теории МКЭ [13]:

$$\{\delta\}^e = \{\delta_i, \delta_j, \dots\}^T.$$

Напряжения определяются:

$$\{\sigma\} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\},$$

где  $[D]$  – матрица упругости, содержащая характеристики материала;

$\{\varepsilon\}$ ,  $\{\sigma\}$  и  $\{\varepsilon_0\}$ ,  $\{\sigma_0\}$  – достигнутые и начальные деформации, напряжения, соответственно.

Распределённые нагрузки и напряжения, возникающие на границе элемента, статически эквивалентны узловым силам элемента:

$$\{F\}^e = \{F_i, F_j, F_m, \dots\}^T.$$

Получаем обобщенное соотношение:

$$\{F\}^e = \left( \int_{V^e} [B]^T [D] [B] dV \right) \{\delta\}^e - \int_{V^e} [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV + \int_{V^e} [B]^T \{\sigma_0\} dV - \int_{V^e} [N]^T \{p\} dV,$$

или

$$\{F\}^e = [K]^e \{\delta\}^e + \{F\}_{\varepsilon_0}^e + \{F\}_{\sigma_0}^e + \{F\}_p^e,$$

где  $[B]$  – матрица положения;

$[K]^e$  – матрица жёсткости элемента;

$\{F\}_{\varepsilon_0}^e, \{F\}_{\sigma_0}^e, \{F\}_p^e$  – узловые силы, обусловленные начальной деформацией, начальными напряжениями и распределёнными нагрузками, соответственно.

После соответствующих замен получаем:

$$[K] \{\delta\} + \{F\}_p + \{F\}_b + \{F\}_{\varepsilon_0} + \{F\}_{\sigma_0} - \{R\} = 0,$$

где матрица жёсткости всей детали:

$$[K]_{i,j} = \sum_{e=1}^n [K]_{i,j}^e.$$

Таким образом, получаем систему уравнений, которая в матричной форме можно представить следующим образом:

$$[K_1] \{\delta_1\} = \{F_1\},$$

$$[K_2] \{\delta_2\} = \{F_2\},$$

где  $\{\delta_1\}$  – перемещения 1-ой контактируемой детали;

$\{\delta_2\}$  – перемещения 2-ой контактируемой детали;

$\{F_1\}$  и  $\{F_2\}$  – матрицы сил для 1-ой и 2-ой контактируемой деталей соответственно.

На рисунках 3.3-3.5 представлены результаты анализ НДС конструкции кронштейна проектируемого специального зубополировального станка.

Результаты моделирования показывают, что наибольшая концентрация напряжений, и соответственно наиболее вероятное появления усталостных трещин, сконцентрированы на поверхности тяги кронштейна в точке её изгиба, в которой под действием силы от массы уравнивающего груза, максимальное напряжение  $\sigma = 20,87$  МПа (точка 11, рисунок 3.3).

На рисунке 3.4 показаны перемещений точек тяги кронштейна при приложении изгибающей нагрузки.

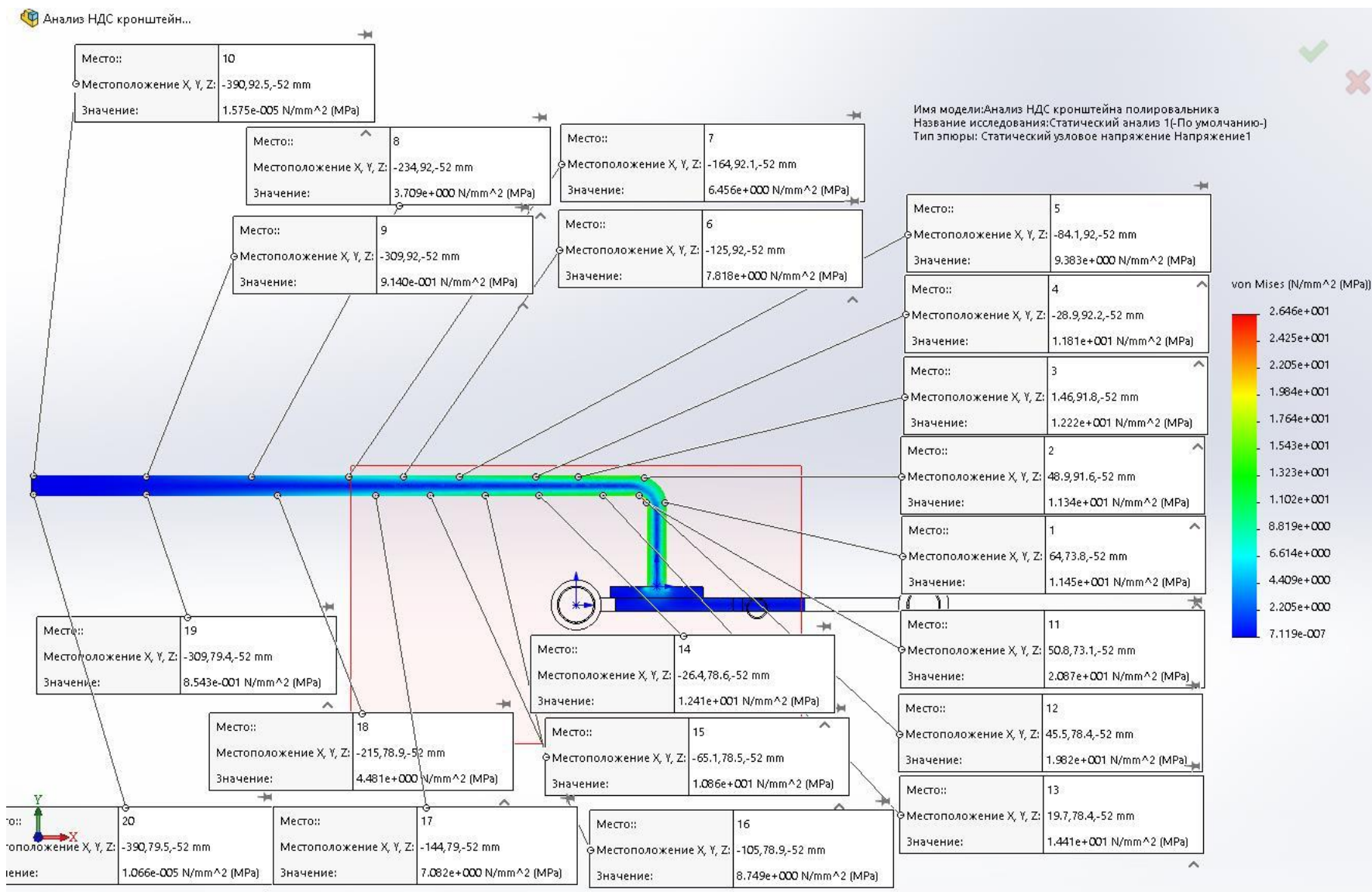


Рисунок 3.3 – Эпюра напряжений кронштейна

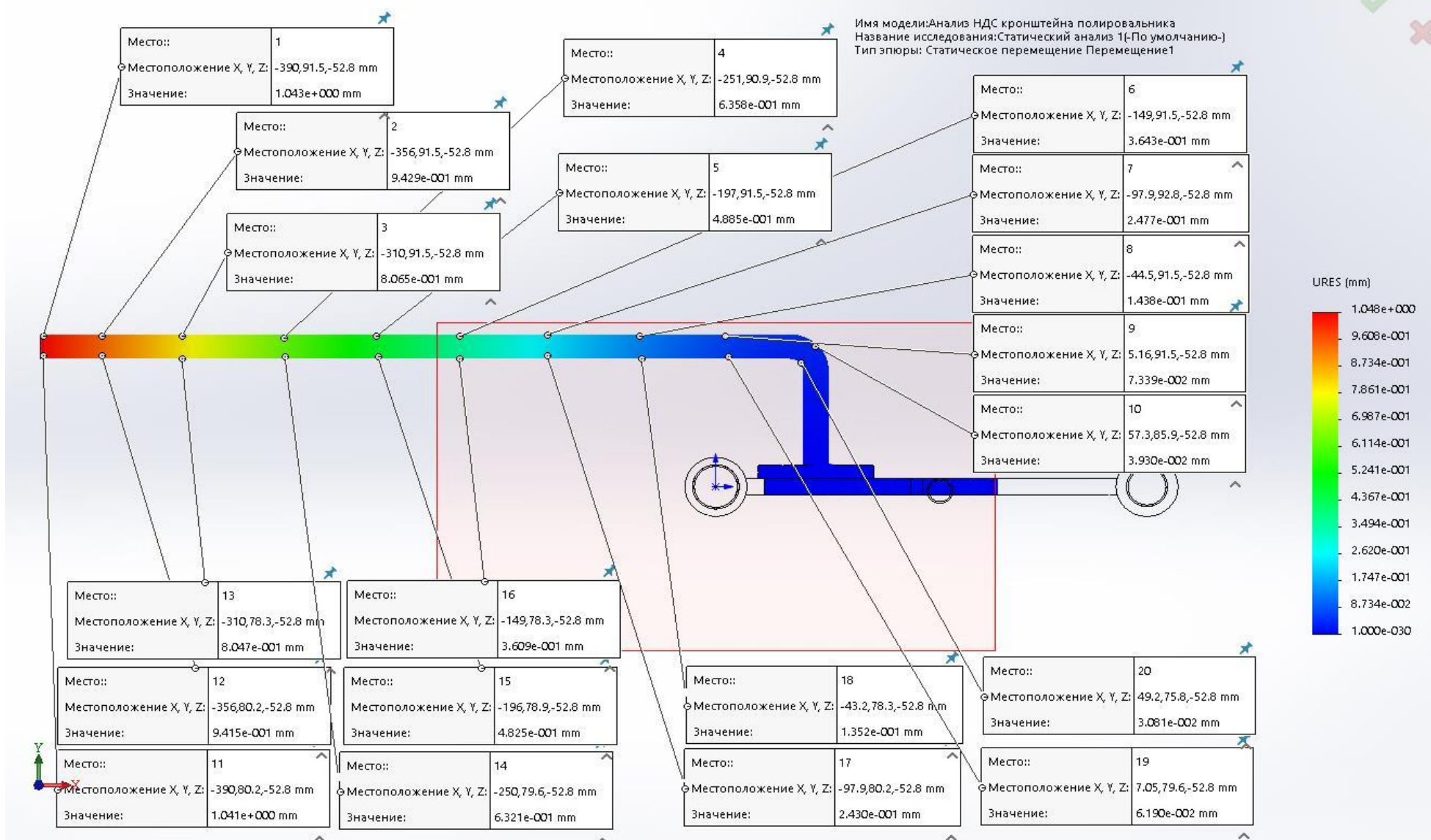


Рисунок 3.4 – Эпюра перемещения кронштейна

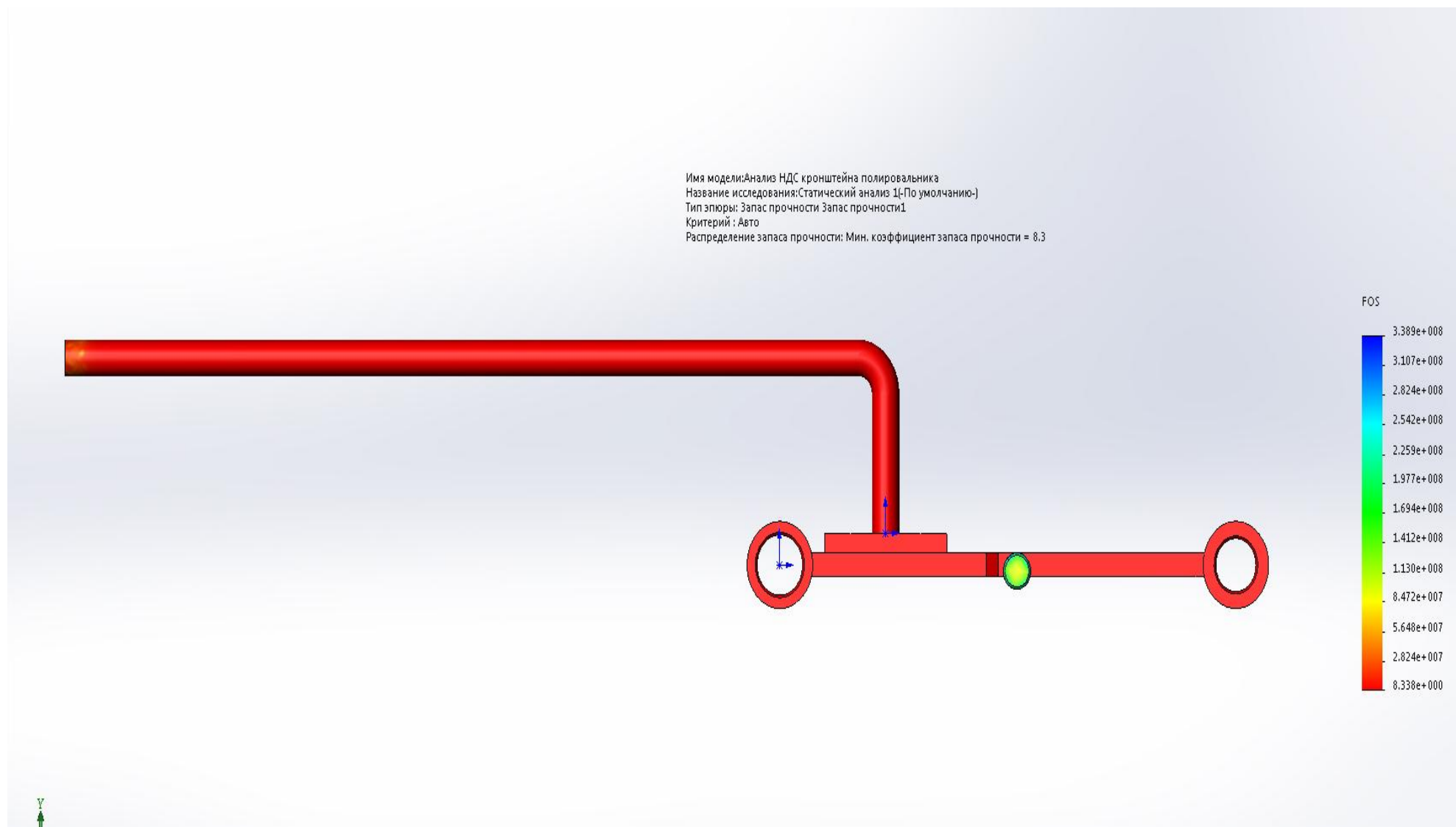


Рисунок 3.5 – Эпюра запаса прочности кронштейна

На рисунке 3.5 представлена эпюра запаса прочности кронштейна. Коэффициент запаса прочности равен 8,3 – это удовлетворяет критериям работоспособности, предъявляемым к конструкциям в машиностроении.

Таким образом, применение CAD-, CAE-систем при проектировании любого технологического оборудования помогают не только ускорить переход от расчетов к составлению конструкторской документации, благодаря стандартным библиотекам и системам автоматизированного составления конструкторской документации, но и создают огромную базу для проведения инженерных расчетов и автоматизированного внесения изменений в конструкцию.

#### 4 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ТРИБОВ НА СТАНКЕ

Для разработки технологии обработки зубьев трибов на спроектированном специальном зубополировальном станке были проведены экспериментальные исследования влияния технологии полирования зубьев трибов на шероховатость поверхности.

Исследовались четыре варианта технологий выполнения операции зубополирования:

- 1) полировальный круг (материал – дуб) + паста (эльборовая «ЛМ 40/28 НОМГ»);
- 2) полировальный круг (материал – дуб) + паста (разработанный состав);
- 3) полировальный круг (материал – бук) + паста (эльборовая «ЛМ 40/28 НОМГ»);
- 4) полировальный круг (материал – бук) + паста (разработанный состав).

Шероховатость рабочих поверхностей зубьев трибов после операции полирования должна быть не более –  $Ra\ 0,8\ \mu\text{м}$ . Исследования проводились на базе предприятия ПАО «Электромеханика».

При проведении экспериментальных исследований использовались стандартные и поверенные средства измерения и оборудование. Образцы деталей, предназначенные для экспериментальных исследований, измерялись на двойном инструментальном микроскопе типа МИС-11 (рисунок 4.1), осуществлялся контроль шероховатости поверхности зубьев трибов до операции зубополирования и после.



Рисунок 4.1 – Общий вид двойного инструментального микроскопа МИС-11

Двойной микроскоп предназначен для визуальной оценки, измерения и фотографирования высоты неровностей наружных поверхностей деталей, принцип действия основан на методе светового сечения.

В таблице 4.1 приведены характеристики сменных объективов к микроскопу МИС-11.

Таблица 4.1 – Характеристики сменных объективов к двойному  
инструментальному микроскопу МИС-11

| Параметр объектива                                  | Сменный объектив |               |               |               |
|-----------------------------------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
|                                                     | ОС-39            | ОС-40         | ОС-41         | ОС-42         |
| Фокусное расстояние, дптр                           | 25               | 13,89         | 8,16          | 4,25          |
| Апертура, дптр                                      | 0,13             | 0,3           | 0,37          | 0,5           |
| Увеличение, крат                                    | 5,9              | 10,5          | 18            | 34,5          |
| Общее увеличение, крат с<br>МОВ-1 х 15              | 87               | 157           | 270           | 517           |
| Линейное поле зрения, мм                            | 2                | 1,08          | 0,67          | 0,33          |
| Пределы измерения высот<br>неровностей, мкм         | 6,3–62,5         | 3,2–18,7      | 1,6–10        | 0,8–3,2       |
| Цена деления барабана<br>МОВ при измерении,<br>мкм: |                  |               |               |               |
| – высот неровностей                                 | 0,82 – 0,86      | 0,450 – 0,474 | 0,269 – 0,285 | 0,139 – 0,145 |
| – шагов неровностей                                 | 1,16 – 1,22      | 0,636 – 0,67  | 0,38 – 0,403  | 0,197 – 0,205 |
| Допускаемая<br>погрешность, %                       | 7,5 – 13,5       | 10,5 – 18     | 13,5 – 21     | 21 – 24       |

Для проведения экспериментальных исследований было отобрано 4 партии по 10 образцов деталей трибов с числом зубьев – 64 и модулем – 0,16 мм, имеющих шероховатость рабочих поверхностей зубьев, после предыдущей операции – фрезерование, в диапазоне от  $Ra$  1,23 мкм до  $Ra$  1,26 мкм.

В таблице 4.2 представлены физико-механические характеристики полировальных кругов из дуба и бука.

Таблица 4.2 – Физико-механические характеристики  
полировальных кругов из дуба и бука

| Характеристики                      | Параметры полировального круга: |           |
|-------------------------------------|---------------------------------|-----------|
|                                     | дуб                             | бук       |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>        | 570...690                       | 550...680 |
| Объемный вес, кг/м <sup>3</sup>     | 700...800                       | 670...780 |
| Предел прочности, МПа               | 55,9                            | 53        |
| Модуль упругости, ГПа               | 12,2                            | 14,1      |
| Твердость:                          |                                 |           |
| – торцевая, Н/мм <sup>2</sup>       | 57,3                            | 65,1      |
| – радиальная, Н/мм <sup>2</sup>     | 48,2                            | 53,2      |
| – тангенциальная, Н/мм <sup>2</sup> | 52,8                            | 49,5      |

В качестве абразивного компонента применялись: паста эльборовая «ЛМ 40/28 НОМГ», приобретенная в специализированном магазине (известный состав пасты) и паста, изготовленная на заводе ПАО «Электромеханика» – разработанный состав (см. таблицу 4.3).

Таблица 4.3 – Разработанный состав пасты заводом  
ПАО «Электромеханика»

| Компонент                                                                                                                                                               | Доля компонента в составе, % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Шлифовальный порошок                                                                                                                                                    | 76                           |
| Олеиновая кислота                                                                                                                                                       | 11                           |
| Парафин                                                                                                                                                                 | X                            |
| «X»                                                                                                                                                                     | X                            |
| Примечание: В графе «Компонент» и «Доля компонента в составе» – значком X обозначена информация содержащая коммерческую тайну предприятия (№ 98-ФЗ от 29 июля 2004 г.). |                              |

В таблице 4.4 представлены результаты экспериментальных исследований влияния технологии полирования зубьев трибов на шероховатость поверхности.

Таблица 4.4 – Результаты экспериментальных исследований влияния технологии полирования зубьев трибов на шероховатость поверхности

| Вариант технологий выполнения операции зубополирования:                                                                    |                          |                                                                                           |                          |                                                                |                          |                                                                                           |                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1 вариант                                                                                                                  |                          | 2 вариант                                                                                 |                          | 3 вариант                                                      |                          | 4 вариант                                                                                 |                          |
| Полировальный круг<br>(материал – дуб)                                                                                     |                          |                                                                                           |                          | Полировальный круг<br>(материал – бук)                         |                          |                                                                                           |                          |
| T≈340                                                                                                                      |                          |                                                                                           |                          | T≈460                                                          |                          |                                                                                           |                          |
| Паста полиро-<br>вальная эльбо-<br>ровая<br>«ЛМ 40/28<br>НОМГ»                                                             |                          | Паста, изготовлен-<br>ная на заводе ПАО<br>«Электромеханика»<br>– разработанный<br>состав |                          | Паста полиро-<br>вальная эльбо-<br>ровая<br>«ЛМ 40/28<br>НОМГ» |                          | Паста, изготовлен-<br>ная на заводе ПАО<br>«Электромеханика»<br>– разработанный<br>состав |                          |
| Количество<br>образцов, шт                                                                                                 | Шероховатость<br>Ra, мкм | Количество<br>образцов, шт                                                                | Шероховатость<br>Ra, мкм | Количество<br>образцов, шт                                     | Шероховатость<br>Ra, мкм | Количество<br>образцов, шт                                                                | Шероховатость<br>Ra, мкм |
| 6                                                                                                                          | 0,7                      | 4                                                                                         | 0,8                      | 5                                                              | 0,74                     | 2                                                                                         | 0,82                     |
| 3                                                                                                                          | 0,72                     | 3                                                                                         | 0,79                     | 2                                                              | 0,73                     | 3                                                                                         | 0,76                     |
| 1                                                                                                                          | 0,73                     | 2                                                                                         | 0,77                     | 2                                                              | 0,7                      | 2                                                                                         | 0,78                     |
| –                                                                                                                          | –                        | 1                                                                                         | 0,75                     | 1                                                              | 0,76                     | 1                                                                                         | 0,79                     |
| –                                                                                                                          | –                        | –                                                                                         | –                        | –                                                              | –                        | 1                                                                                         | 0,74                     |
| –                                                                                                                          | –                        | –                                                                                         | –                        | –                                                              | –                        | 1                                                                                         | 0,73                     |
| Примечание. T – число двойных ходов, совершенное приспособлением с обрабатываемой деталью, в ходе проведения эксперимента. |                          |                                                                                           |                          |                                                                |                          |                                                                                           |                          |

Анализ данных таблицы 4.4 показывает, что разница между применяемыми при полировании составами паст (эльборовая «ЛМ 40/28 НОМГ» или разработанный состав на заводе ПАО «Электромеханика») в зависимости от получаемой шероховатости поверхности составляет в среднем 5 – 10%. Однако стоимость пасты, разработанной на предприятии, на 45% ниже по сравнению с пастой эльборовой «ЛМ 40/28 НОМГ».

Применение полировального круга из бука, по сравнению с полировальным кругом из дуба, приводит к увеличению на 25 – 35% числа двойных ходов совершаемых приспособлением с обрабатываемой деталью до получения поверхностей требуемого качества. Несомненно, увеличение числа двойных ходов ведет к увеличению времени обработки, однако с учетом годового производства и в первую очередь с себестоимостью материалов полировальных кругов и их технологий изготовления – экономический эффект существенен.

Для построения и вывода более детальных закономерностей, в рамках выполняемых исследований, требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований. Однако уже полученные результаты позволяют сделать основной вывод, что спроектированный станок, в совокупности с рассмотренными технологиями, обеспечивает функциональные возможности, соответствующие операции полирования.

Таким образом, рассмотренные технологии показали свою эффективность в обеспечении требуемой шероховатости рабочих поверхностей зубьев трибов.

## 5 РАЗРАБОТКА СОСТАВА ПОЛИРОВАЛЬНОЙ ПАСТЫ

Процесс обработки происходит в результате нанесения на диск полировальной пасты. Суть данного метода обработки заключается в том, что в составе пасты содержатся абразивные вещества (шлифовальные и микрошлифовальные порошки), благодаря которым происходит удаление металла, и поверхностно-адгезивные вещества, активно удаляющие микростружку и другие элементы, остающиеся после обработки.

Паста представляет собой мажеобразную консистенцию, содержащую микроскопические алмазные частицы. Входящие в состав поверхностно-активные соединения обеспечивают быстрое выведение стружки, шлаков, обеспечивают простоту промывания. Благодаря этим характеристикам, полировальные пасты улучшают качество и уменьшают время обработки.

Предварительно, для выполнения операции зубополирования трибов, была выбрана полировальная паста ЛМ 40/28 НОМГ.

Это эльборовая паста, в качестве абразива используется кубический нитрид бора. Применяется данная паста для доводки и заточки металлов из легированных сталей, и полировки закаленных и стеклянных поверхностей.

В составе пасты имеются ПАВ-ы (поверхностно активные вещества), удаляющие из зоны обработки отходы и обеспечивают качественную промывку обрабатываемой детали. Все это в результате дает полированную поверхность абсолютной точности.

Ниже представлена информация о разработанном составе полировальной пасты в лаборатории завода ПАО «Электромеханика».

В качестве основного материала полировальной пасты (76%) был принят микрошлифовальный порошок марки М7 (F1000). Это кристаллический порошок белого цвета, состоящий из кристаллов корунда с размером зерна –  $4,5 \pm 0,8$  мкм.

Добавкой, оказывающей активирующее действие на поверхностный слой металла, принята олеиновая кислота. Количество олеиновой кислоты в пасте – 11%.

В качестве связующего вещества принят парафин, в количестве X% (информация содержащая коммерческую тайну предприятия № 98-ФЗ от 29 июля 2004 г.).

Однако использование парафина, как основного загустителя недостаточно. Состав получается неоднородным, непластичным и быстро высыхает. Поэтому, для улучшения густоты и адгезии было принято решение о введении в состав пасты ПАВ (поверхностно активного вещества). В главе 4 магистерской диссертации этот компонент обозначен «X» в количестве X% (информация содержащая коммерческую тайну предприятия № 98-ФЗ от 29 июля 2004 г.).

Введение компонента «X» позволило не только разрешить выявленные недостатки густоты и адгезии, но и получить обработанную поверхность, максимально схожую с поверхностью, после обработки пастой ЛМ 40/28 НОМГ. Но при этом, компонент «X» является природным компонентом и не оказывает агрессивного воздействия на организм человека и не вызывает аллергических реакций, вызываемых при использовании пасты ЛМ 40/28 НОМГ.

Порядок приготовления полировальной пасты:

1) В таре расплавляются соответствующее количество парафина и компонента «X».

2) В расплавленную массу добавляют олеиновую кислоту и, перемешивая, постепенно добавляют небольшими порциями шлифовальный порошок.

3) Перемешивают тщательно до тех пор, пока паста не начнет густеть, после чего сливают в форму.

Застывшую пасту вынимают из формы и упаковывают в восковую бумагу.

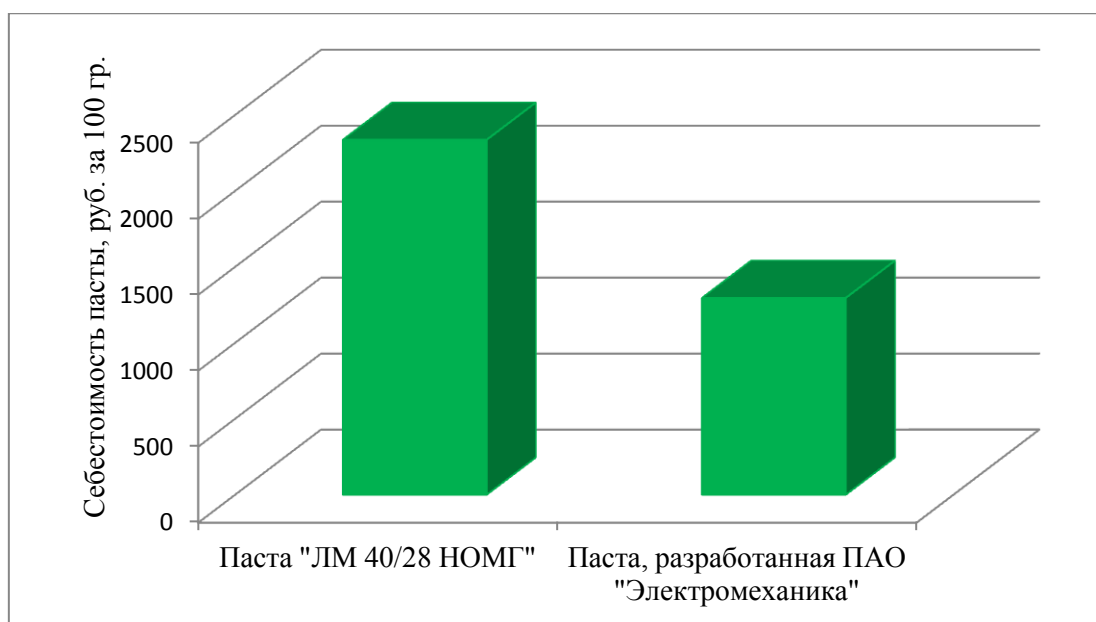


Рисунок 5.1 – Графики стоимости приобретенной и разработанной паст

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что разница между применяемыми при полировании составами паст (эльборовая «ЛМ 40/28 НОМГ» или разработанный состав на заводе ПАО «Электромеханика») в зависимости от получаемой шероховатости поверхности составляет в среднем 5 – 10%.

Однако стоимость пасты, разработанной на предприятии, на 45% ниже по сравнению с пастой эльборовой «ЛМ 40/28 НОМГ» (см. рисунок 5.1).

## 6 РАЗРАБОТКА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАНКА

Еще на начальных этапах проектирования станка необходимо предусматривать разработку правил техники безопасности и эксплуатации.

Работа на станках всех типов требует соблюдение техники безопасности эксплуатации станка во избежание получения травм оператора станка и окружающих.

При работе на специальном зубополировальном станке следует выполнять ниже приведенные правила техники безопасности и эксплуатации:

- 1) Станок надежно заземлить;
- 2) Обработку деталей производить только с защитным кожухом, закрывающим полировальный круг;
- 3) В процессе загрузки и выгрузки детали станок выключать;
- 4) Перед запуском станка обязательно произвести проверку надежности установки детали в приспособлении;
- 5) Перед началом чистовой обработки в обязательном порядке проверить надежность закрепления груза на кронштейне;
- 6) Перед установкой на станок, полировальный круг подвергнуть внешнему осмотру с целью визуальной оценки инструмента на наличие заметных трещин и выбоин;
- 7) К обработке не допускаются: гнутые детали; детали, устанавливаемые в приспособление с усилием; детали с видимым нарушением профиля зубьев триба;
- 8) В процессе обработки, полировальный круг подавать на обрабатываемую деталь плавно, без рывков и резкого нажатия;
- 9) К работе за станком допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомленные с паспортом станка.

Следует отметить, что по окончании разработки конструкции станка, настоящую технику безопасности необходимо расширить в процессе

эксплуатации станка, проработав такие аспекты, как: требования безопасности в аварийных ситуациях, в процессе и по окончании обработки.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ принципа работы часового механизма скоростемера показал, что шероховатость рабочей поверхности зубьев триба оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики всего механизма. Шероховатость рабочих поверхностей зубьев триба должна быть не более  $Ra\ 0,8$  мкм и достигается применением доводочных (финишных) операций, таких как полирование, шлифование и т.п.

2. Анализ производственных и литературных данных по технологиям обработки трибов показал, что применение шлифовальных и хонинговальных станков приводит к увеличению стоимости обработки и к сложности осуществления быстрой переналадки станка под другой типоразмер обрабатываемых деталей, что является существенными недостатками. Использование полировальных станков свободно от указанных недостатков.

3. Разработана принципиальная (технологическая) схема станка специального зубополировального, соответствующая технологии обработки детали «Триб». Также разработаны структурная, компоновочная и кинематическая схемы станка.

4. Разработаны рекомендации по определению геометрических параметров инструмента (полировальный круг) с учетом геометрии обрабатываемой детали (триб) и формообразующих движений станка.

5. Разработана трехмерная модель конструкции сборки станка специального зубополировального в CAD-программе SolidWorks.

6. Проведенный анализ напряженно-деформированного состояния кронштейна станка методом конечных элементов показал, что конструкция соответствует критериям работоспособности, предъявляемым в машиностроении.

7. Разработан состав специальной зубополировальной пасты.

8. Экспериментально установлено, что разница между применяемыми при полировании составами паст (эльборовая «ЛМ 40/28 НОМГ» или разработанный состав) в зависимости от получаемой шероховатости поверхности составляет в среднем 5 – 10%. Однако стоимость пасты, разработанной на предприятии, на 45% ниже по сравнению с пастой эльборовая «ЛМ 40/28 НОМГ».

9. Экспериментально установлено, что применение полировального круга из бука, по сравнению с полировальным кругом из дуба, приводит к увеличению на 25 – 35% числа двойных ходов совершаемых приспособлением с обрабатываемой деталью до получения поверхностей требуемого качества. И как следствие к увеличению времени обработки, однако с учетом годового производства и в первую очередь с себестоимостью материалов полировальных кругов и их технологий изготовления – экономический эффект существенен.

10. Для построения и вывода более детальных закономерностей, в рамках выполняемых исследований, требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований. Однако уже полученные результаты позволяют сделать основной вывод, что спроектированный станок, в совокупности с рассмотренными технологиями, обеспечивает функциональные возможности, соответствующие операции полирования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железные дороги [сайт]. URL: <https://lokomo.ru/podvizhnoy-sostav/ckorostemer-3sl-2m.html>.
2. Головин Г.М., Пешков Е.О. Специальные станки в приборостроении. – М.: МАШГИЗ, 1952. – 230 с.
3. Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. – М.: Машиностроение, Том 1, 1986. – 656 с.
4. Пантелеев, В.Ф. Расчеты деталей машин : учеб. пособие / В.Ф. Пантелеев, Д.В. Кочетков. – Изд. 4-е, доп. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 200 с.
5. Творческая мастерская Artifex-Dadel [сайт]. URL: [https://www.artifex-babel.de/ru/werkstatt/prata\\_ru.html](https://www.artifex-babel.de/ru/werkstatt/prata_ru.html).
6. Справочник Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов. – М.: Машиностроение, 1990г.
7. Кащук В.А., Верещагин А.Б., Справочник шлифовщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
8. Никитина И.П. Оборудование машиностроительного производства : лекции / Никитина И.П.. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2006. – 157 с.
9. Врагов Ю.Д., Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компонетики). – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с., ил. В пер.: 95 к.
10. Михеев И.И., Кинематический расчет приводов станков: Учеб. Пособие/ И.И. Михеев, Е.Н. Ярмоленко – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 100 с.
11. Анурьев В.И. Справочник конструктора – машиностроителя: в 3-х т.: Т. 3. – 9-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – 928 с.

12. Копыленко, Ю.В. Расчёт динамических характеристик приводов главного движения металлорежущих станков : учеб. пособие / Ю.В. Копыленко, В.С. Хомяков. – М. : Мосстанкин, 1986. – 40 с.
13. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК, 2007. – 784 с.
14. Иванова В.С. Разрушение металлов. Серия «Достижения отечественного металловедения». – М.: Металлургия, 1979. – 168 с.
15. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 400 с.
16. Бреббия К. и др. Методы граничных элементов: Пер. с англ. / Бреббия К., Телес Ж., Вроубел Л. – М.: Мир, 1987. – 524 с.
17. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 544 с.
18. Поротников Е.М., Журенко А.Ю., Бугаев В.Г. SolidWorks – мощный инструмент трехмерного моделирования. – Владивосток: ДВГТУ, 2008. – 316 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ  
НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНОГО  
ЗУБОПОЛИРОВАЛЬНОГО СТАНКА

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б – НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

## ПРИЛОЖЕНИЕ В – ПРЕЗЕНТАЦИЯ