

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт

Факультет материаловедения и металлургических технологий  
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ /Радионова Л.В./

\_\_\_\_\_ 2020 г.

***ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ СТАНА  
ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СОВРЕМЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДОВ***

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

**К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА**

*ЮУрГУ – 15.03.02 – 2020 – 100 – 00.00.00 ПЗ*

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_ *ст.преп.*

*Сиверин Олег Олегович*

\_\_\_\_\_ 2020 г.

Руководитель работы

\_\_\_\_\_ *ст.преп.*

*Сиверин Олег Олегович*

\_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы  
студент группы П-439

\_\_\_\_\_ *Григорян Гегам Артакович*

\_\_\_\_\_ 2020 г.

Челябинск  
2020

## АННОТАЦИЯ

Григорян Г.А. – Челябинск: ЮУрГУ, ПИ, МиМТ, 2020. – 49 с., 43 ил., библиогр. список – 7 наим., 3,75 листа чертежей ф. А1.

Создана трехмерная модель лабораторного трехвалкового стана поперечно-винтовой прокатки РСП-20, по которой выполнены чертежи и проведено исследование конструкции рабочей клетки. Разработан вариант по модернизации рабочей клетки с применением современных систем автоматизированного проектирования. Создана уменьшенная модель рабочей клетки с применением деталей созданных FDM-методом.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Ведение.....	6
1.Обзор существующих конструкций прокатных станов использующих принцип поперечно-винтовой прокатки.....	7
1.1 Патент на рабочую клетку стана поперечно винтовой прокатки.....	7
1.2 Стан РСП-130.....	10
2. Обзор конструкции лабораторного стана РСП-20.....	13
3. Предложение по модернизации машины .....	18
3.1 Разработка привода винтов. ....	18
3.2 Прочностной анализ разработанной конструкции.....	21
3.3 Принцип работы АСУ.....	24
3.3.1 Определение АСУ крайнего положения узла валка .....	24
3.3.2 Порядок работы АСУ.....	25
3.3.3 Требования предъявляемые к АСУ .....	25
4. Особенности создания трехмерной модели стана.....	26
5. Оптимизация трехмерной модели рабочей клетки под печать методом послойного наплавления .....	30
6. Прочностной расчет рабочей клетки .....	37
7. Маршрутно-операционный технологический процесс изготовления детали «Винт» .....	42
Заключение. ....	50
Библиографический список. ....	49

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно применяются системы автоматизированного проектирования, такие системы позволяют проектировать различные детали и машины, анализировать их конструкцию, осуществлять проверку работоспособности, вносить изменения, а так же модернизировать уже созданные образцы. Преимуществом САПР является существенное сокращение времени на проектирование и расчет конструкций, наглядность работы, и экономия, так как на ранних этапах проектирования нет необходимости изготавливать реальные прототипы для испытаний, все расчеты и тесты можно провести на цифровом аналоге.

Целью данной работы является исследование и анализ конструкции лабораторного трехвалкового стана РСР-20, разработка варианта по автоматизации рабочей клетки стана, создание уменьшенной модели рабочей клетки с применением деталей распечатанных FDM-методом с использованием современных САПР таких как AutoCAD и SolidWorks.

# 1. ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРИНЦИП ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

## 1.1 Патент на рабочую клетку стана поперечно-винтовой прокатки [1]

Рабочая клетка стана поперечно-винтовой прокатки содержит станину, в расточках которой установлены через  $120^\circ$  три рабочих валка, закрепленных в поворотных барабанах при помощи подшипниковых опор. Разворот валков на угол подачи осуществляется тремя механизмами разворота и стопорения барабанов. Установка рабочих валков на необходимый размер калибра осуществляется механизмами перемещения барабанов, каждый из которых имеет неподвижную гайку, нажимной винт со шлицевым участком, редуктор электромеханического привода и гидроцилиндр. Нажимной винт выполнен полым и сквозь него проходит уравнивающая тяга, поджимающая барабан через сферическую пятку к нажимному винту. Гидроцилиндр выполнен двустороннего действия, его корпус закреплен на станине, а гайка механизма перемещения барабана закреплена в полом поршне гидроцилиндра. Такое конструктивное выполнение рабочей клетки стана поперечно-винтовой прокатки позволяет повысить надежность и долговечность, а также облегчить ремонтоспособность за счет упрощения ее конструкции.

Рабочая клетка (Рисунок 1-3) стана поперечно-винтовой прокатки содержит станину 1, в расточках которой установлены через  $120^\circ$  три рабочих валка 2-4, закрепленных в поворотных барабанах 5-7 при помощи подшипниковых опор (не показано). Разворот валков на угол подачи осуществляется тремя механизмами 8-10 разворота и стопорения барабанов. Установка рабочих валков на необходимый размер калибра осуществляется механизмами 11-13 перемещения барабанов, каждый из которых имеет гайку 14, нажимной винт 15 со шлицевым участком, редуктор 16 электромеханического привода и гидроцилиндр 17. Корпус редуктора 16 закреплен на станине 1. Нажимной

винт 15 выполнен полым и сквозь него проходит уравнивающая тяга 18, поджимающая барабан через сферическую пяту 19 к нажимному винту 15.

Уравнивание верхнего барабана осуществляется двумя гидроцилиндрами 20, соединенными с тягой 18 через коромысло 21 и гайки 22. Нижние барабаны 6, 7 уравниваются собственной массой, а тяга прижимает барабаны 6, 7 к нажимному винту усилием пружины (не показаны).

Гидроцилиндр 17 выполнен двустороннего действия, его корпус 23 закреплен на станине 1, а гайка 14 механизма перемещения барабана закреплена в полом поршне 24 гидроцилиндра 17. Для поступления рабочей жидкости в гидроцилиндр 17 существуют полости "а" и "б".

Рабочая клетка может применяться для производства труб как при постоянном растворе валков, так и при изменении раствора в процессе прокатки, что необходимо при прокатке тонкостенных труб с утолщенными концами. В этом случае процесс прокатки производится следующим образом.

Калибр настраивается перемещением барабанов с валками посредством механизмов перемещения 11-13. При этом в полости "а" гидроцилиндров 17 подается давление, поршни 24 с гайками 14 и нажимными винтами 15 перемещаются в крайнее положение. Заготовка задается в валки, происходит прокатка ее утолщенного конца. Затем давление подается в полость "б" одновременно всех трех гидроцилиндров 17. Происходит одновременное сведение всех трех барабанов с валками на величину хода поршней 24, калибр уменьшается и происходит прокатка заготовки с тонкой стенкой. Затем барабаны одновременно разводятся (подается давление в полость "а") и происходит прокатка с утолщением заднего конца заготовки.

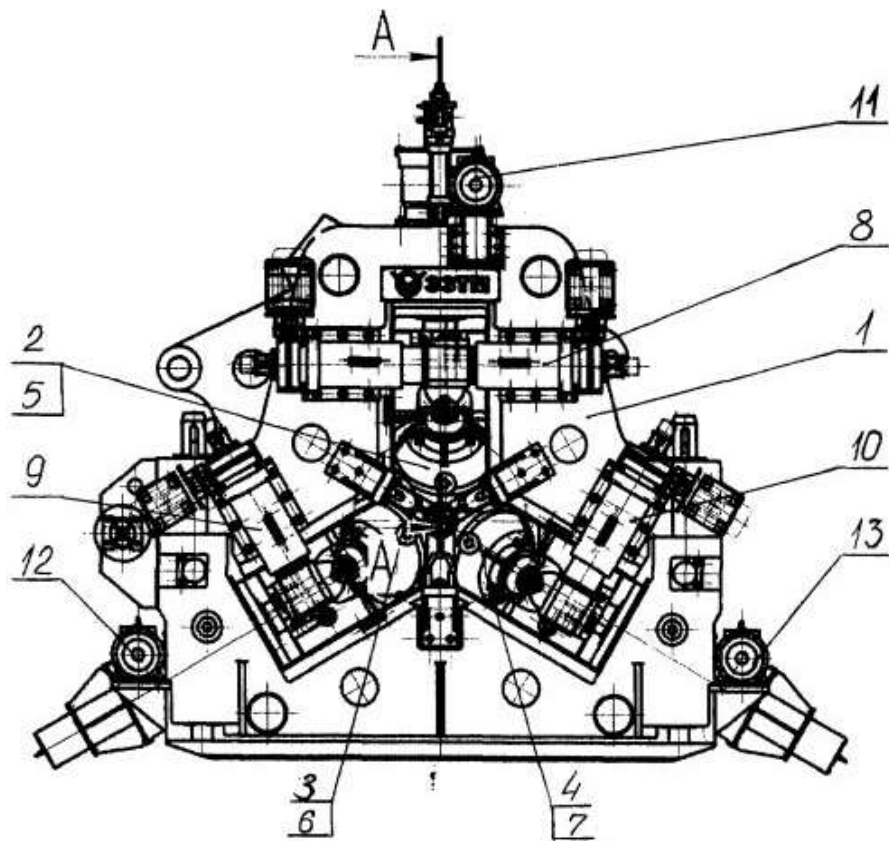


Рисунок 1. Рабочая клеть стана поперечно винтовой прокатки. Общий вид

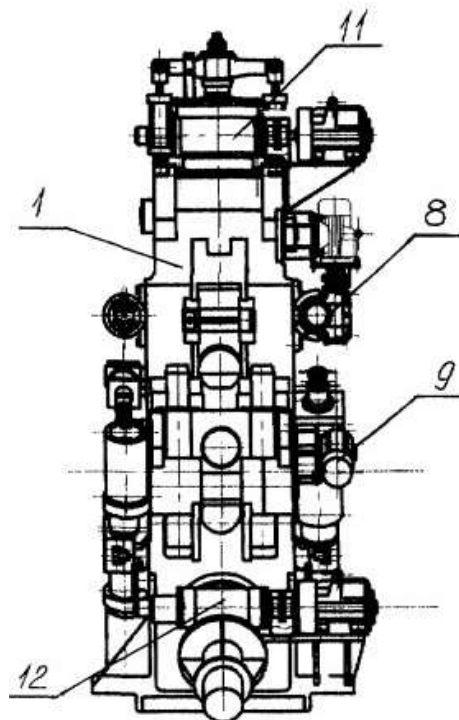


Рисунок 2. Рабочая клеть стана поперечно винтовой прокатки. Вид сбоку

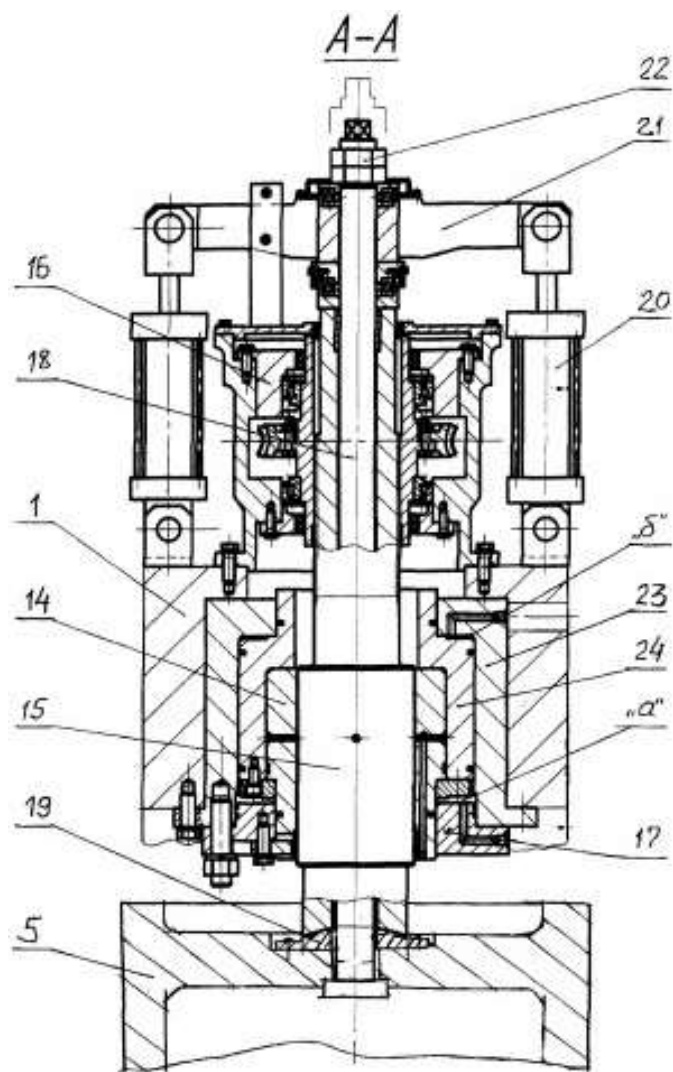


Рисунок 3. Рабочая клетка стана поперечно винтовой прокатки. Вид сбоку

## 1.2 Стан РСП-130 [2]

Стан РСП-130, предназначен для производства высококачественных прутков из титановых сплавов. Конструкция стана позволяет вести реверсивную прокатку.

Схема клетки стана РСП-130 приведена на рисунке 4. Рабочая клетка стана РСП-130 изготовлена в виде литой разъемной станины 1, в цилиндрических расточках которой под углом  $120^\circ$  размещены барабаны 2 с жестко закреплёнными валковыми узлами 3. Расстояние между ними изменяется перемещением барабанов 2 в направляющие станины 4 при помощи



механизма установки валков 5. Разворот валков на требуемый угол подачи достигается вращением барабанов 2 в цилиндрических расточках станины действием механизмов поворота 6 барабана 2. В рабочем положении крышка прилегает к основанию станины опорными поверхностями 7 и 8 и прижимается стяжкой 9, обеспечивая вместе с шарнирным соединением 10 и стяжкой целостность и высокую жёсткость станины. В качестве способа ведения перевалки в линии стана РСП-130 предусмотрена схема замены валков с помощью откидывания крышки клетки с находящимся в ней барабаном. При перевалке нижние барабаны с валками, открыто расположенные в основании станины, заменяются с помощью крана. Для замены же верхнего барабана с валком используется специальный стенд. Стан РСП состоит из двух клеток. Черновая клетка работает в реверсивном режиме. В ней производят 9-11 проходов с разовыми коэффициентами вытяжки 1,15-1,25. Такой режим исключает возможность деформационного нагрева, поскольку температурный интервал деформации титановых сплавов довольно узок. Максимальный диаметр заготовки для черновой клетки составляет 160, а минимальный диаметр раската после прокатки – 75 мм. Конструкция чистой клетки аналогична черновой. В ней производят один проход и обеспечивают высокую точность получаемых прутков, минимальную кривизну и гладкую поверхность. Максимальный диаметр подката для чистой клетки составляет 110, а прутка после прокатки 65 мм. То есть деформационные возможности черновой клетки в данном случае используются не полностью. Полученный на стане РСП-130 пруток диаметром 75-90 мм подают на стан продольной прокатки 450 и прокатывают на прутки диаметром 18-65 мм. Полученные прутки имеют однородную глобулярную структуру металла.

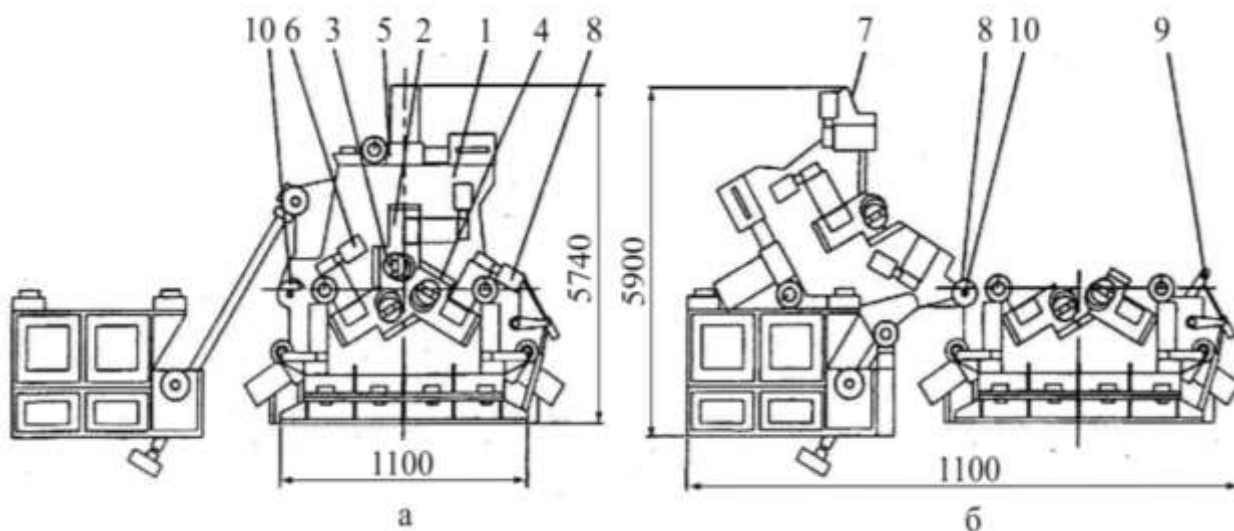


Рисунок 4. Схема клетки стана СРП-130: а – рабочее положение; б – положение перед перевалкой валков

## 2. ОБЗОР КОНСТРУКЦИИ ЛАБОРАТОРНОГО СТАНА РСР-20

Лабораторный трехвалковый стан поперечно-винтовой прокатки РСР-20 предназначен для прокатки заготовок круглого сечения диаметром до 20мм.

Стан состоит из рабочей клетки 1 размещенной на раме 2 (рисунок 5), привод на клетку осуществляется при помощи трех мотор-редукторов 3 через шпиндельное устройство 4. Мотор-редукторы и печь 6 располагаются на раме 5.

Рабочая клетка состоит из (рисунок 6 – 7) двух плит 7 и 8, соединенных стяжками 9, на концах которых установлены гайки 10. В плитах установлены три пары колонн 11, закрепленные конусами 12. На каждой паре колонн размещен один узел валка 17 (рисунок 7), в узле валка находится гайка 18, в которую вкручен винт 14, вращение винта заставляет перемещаться узел валка вдоль колонн. Винт опирается на плиту через втулку 13 и закрепляется гайками 15 и 16.

Для направления заготовки в клеть используется входная проводка 19 закрепленная на плите 8. Для направления проката выходящего из валков используется проводка 20 закрепленная в расточке плиты 7 оседержателем 21 [3]. В зависимости от диаметра заготовки, используются разные проводки с соответствующим внутренним диаметром.

Привод валков 22 осуществляется при помощи трех мотор-редукторов 3, по одному на каждый валок. Мотор-редукторы располагаются на раме 2, в которой также установлена нагревательная печь 6. Крутящий момент к валкам передается через шпиндельное устройство 4 (рисунок 5).

Для замера положения узлов валков 17 на одной из колонн 11 каждой пары установлены кольца 23 (рисунок 6), зафиксированные болтами [1].

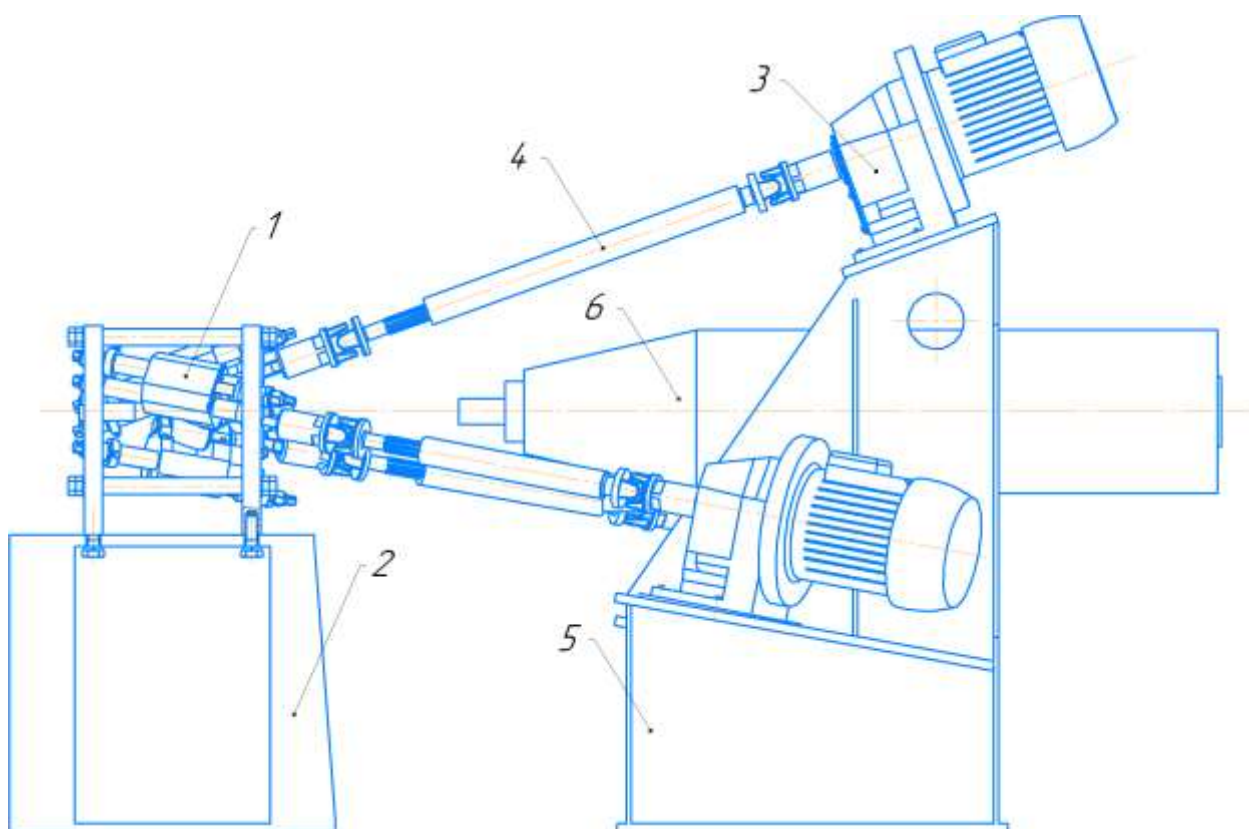


Рисунок 5. Стан РСР-20 вид сборки

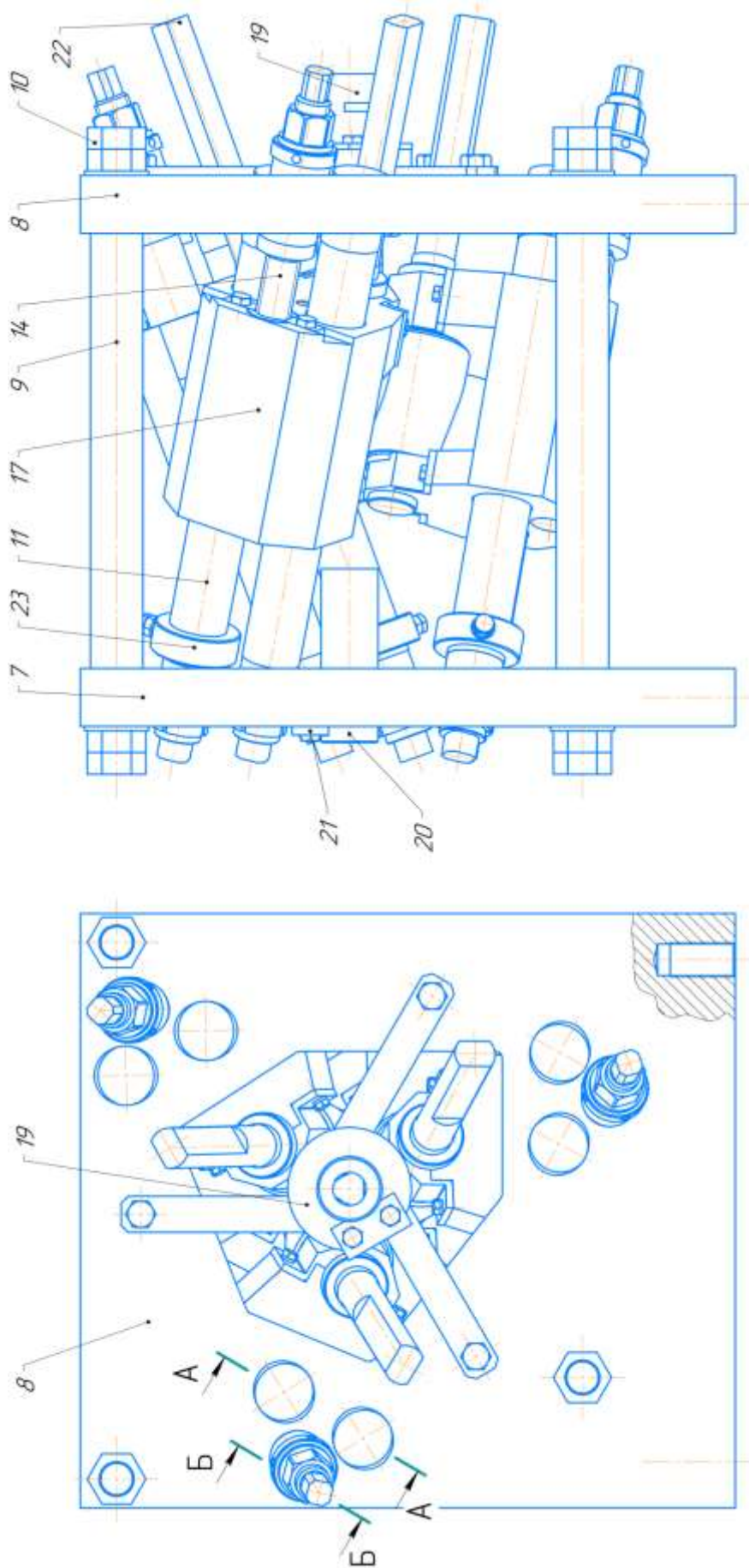


Рисунок 6. Вид спереди и вид сбоку на рабочую клеть

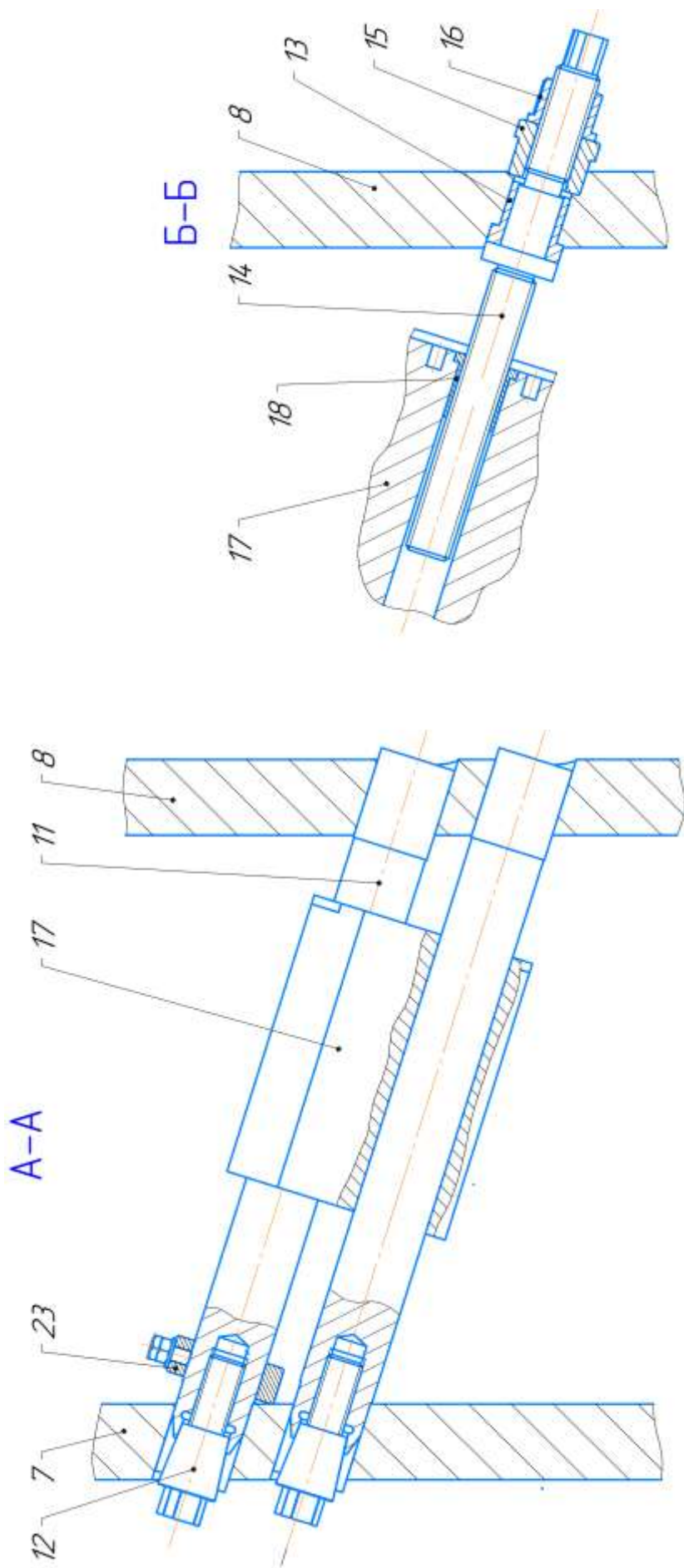


Рисунок 7. Схема установки колонн и винтов в прокатной клетке

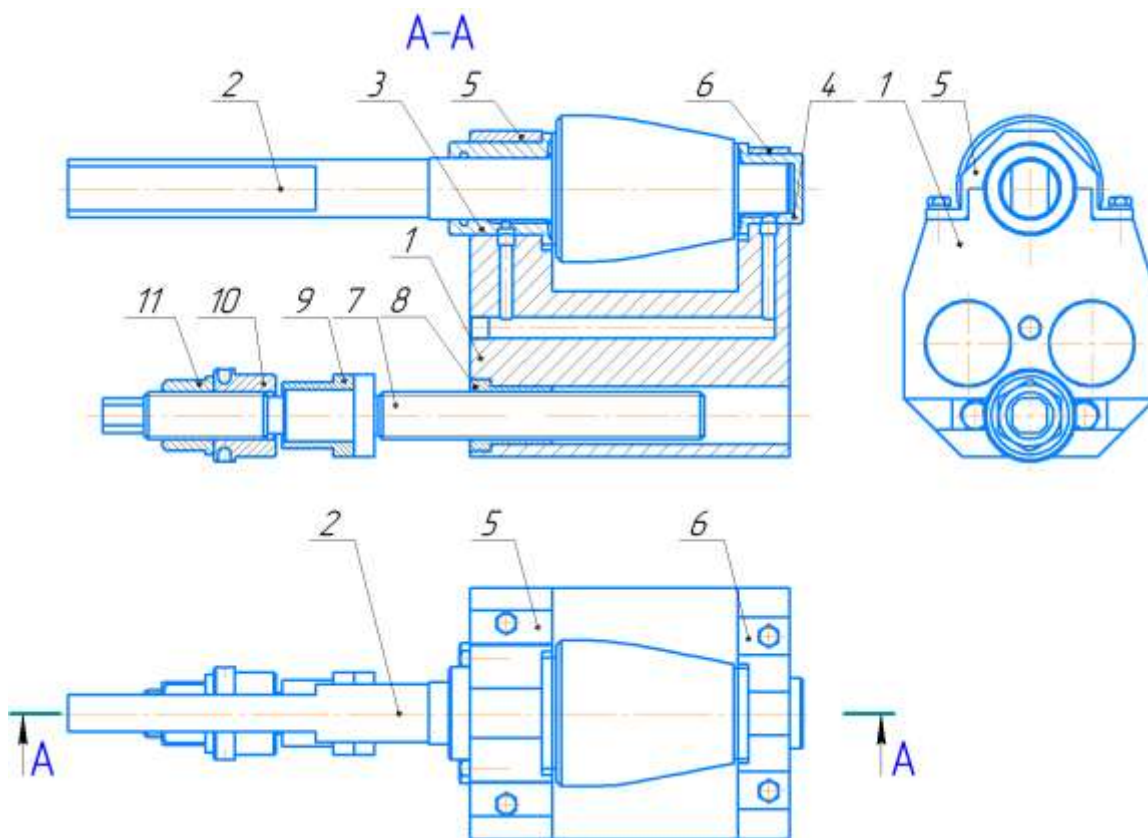


Рисунок 8. Узел валка:

1 – подушка; 2 – валок; 3, 4 – подшипник скольжения; 5, 6 – крышка; 7 – винт; 8, 10, 11 – гайка; 9 – втулка

Настройка рабочей клетки заключается в установлении взаимного расположения валков [3] (рисунок 9).

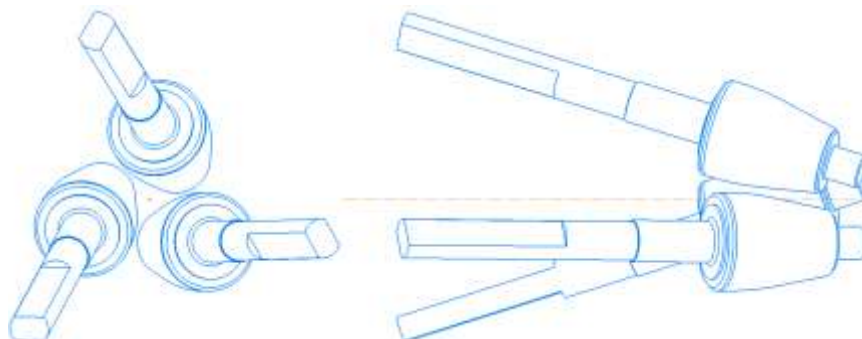


Рисунок 9. Расположение валков



Путем поворота винта осуществляется перемещение узлов валков вдоль колонн [3].

Замер положения осуществляется с помощью шаблона прижимаемого между параллельными поверхностями кольца и подушки показанными красным пунктиром (Рисунок 10).

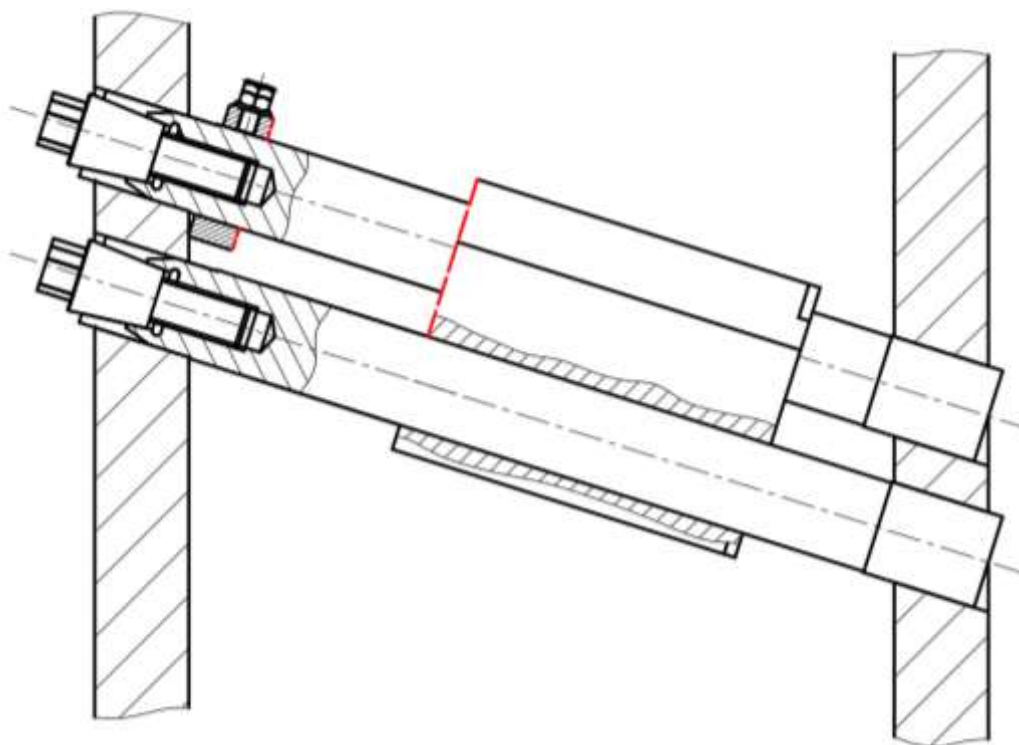


Рисунок 10. Параллельные поверхности подушки и кольца

Такой способ настройки рабочей клетки является довольно простым и надежным, и не требует от оператора большого опыта. Недостатком данного способа является продолжительное время настройки, так как приходится каждый валковый узел выставлять на нужную позицию в индивидуальном порядке, путем ручного вращения винта. Еще одним недостатком является ограниченное количество шаблонов, не позволяющих задавать нестандартные зазоры между валками, например для проведения эксперимента. В таком случае приходится подгонять зазор между валками с помощью измерительного инструмента (линейка, штангенциркуль).

### 3. ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ МАШИНЫ

В данной работе предлагается автоматизировать настройку рабочей клетки, путем оснащения каждого винта индивидуальным приводом в виде мотор-редуктора. Синхронизированная работа привода позволит в автоматизированном режиме задавать необходимое положение валков. Это решение позволит существенно упростить и ускорить настройку рабочей клетки.

Для автоматизации настройки рабочей клетки необходимо создание АСУ с возможностью регулировать перемещение узла валка. АСУ должна в зависимости введенного диаметра заготовки, который мы хотим получить после прохода, выставлять узлы валка на определенном расстоянии от крайнего положения, посредством вращения винта мотор-редукторами на определенное количество оборотов.

#### 3.1 Разработка привода винтов

Для того чтобы выбрать мотор-редуктор, необходимо определить значение минимального крутящего момента, приложенного к винту для его вращения. Установим на винте рычаг, на конце рычага закрепим груз определенной массы, постепенно наращиваем массу груза до тех пор, пока рычаг из вертикального положения не будет занимать горизонтальное, вращая винт и опускаясь под весом груза, условная схема закрепления рычага и груза на винте показана на рисунке 11.

Зная массу груза определим его вес:

$$P_{\Gamma} = m_{\Gamma} \cdot G \quad (1),$$

где  $m_{\Gamma}$  – масса груза, кг;

$G$  – ускорение свободного падения,  $\text{м} / \text{с}^2$ ;



$$P_{\Gamma} = 98 \text{ Н.}$$

Зная плечо приложения веса  $P_{\Gamma}$  можем определить момент винта:

$$M_{\text{в}} = P_{\Gamma} \cdot 0,145 \quad (2);$$

$$M_{\text{в}} = 14,21 \text{ Нм.}$$

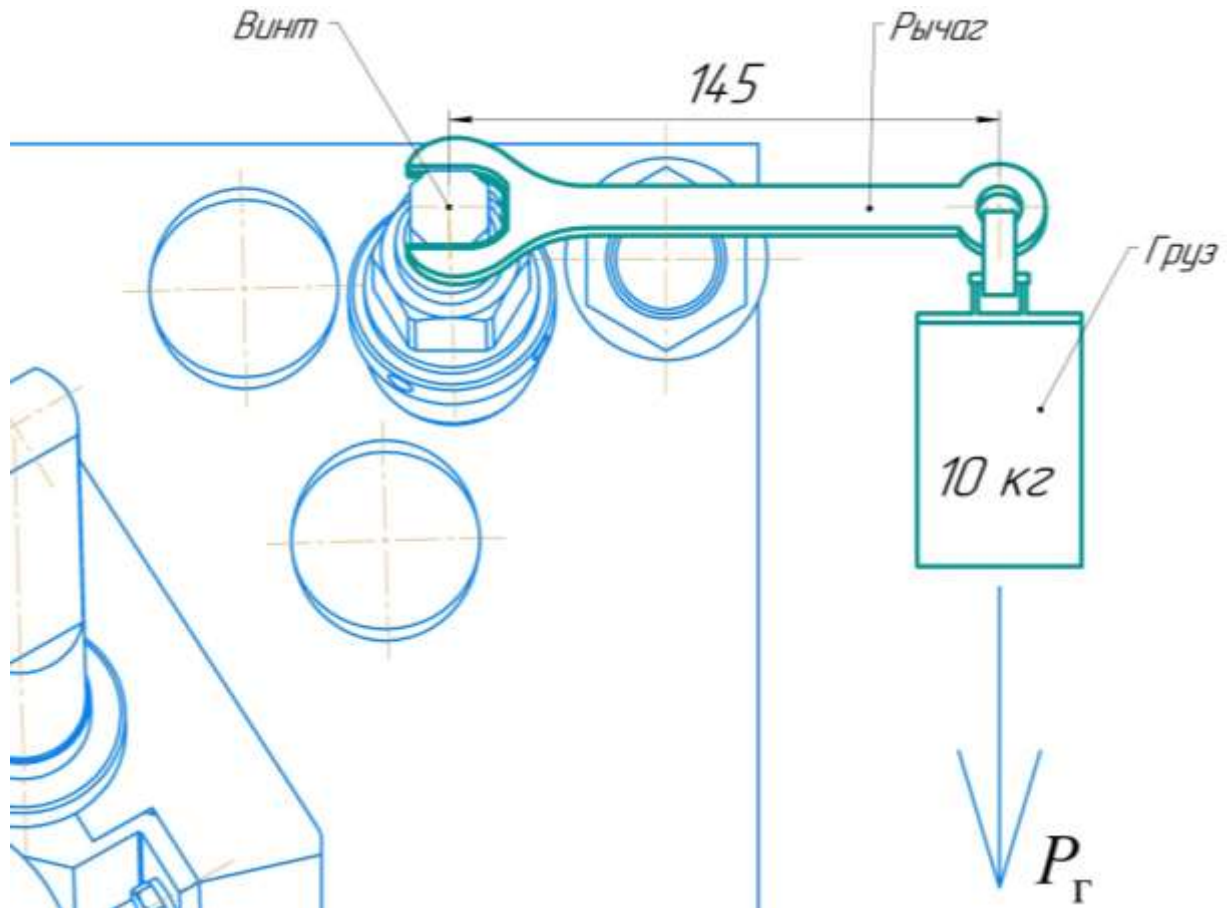


Рисунок 11. Закрепление рычага с грузом на винте

Подберем червячный мотор-редуктор. Данный тип мотор-редукторов отличается компактностью, простотой и надежностью, что делает рациональным использование такого мотор-редуктора в конструкции министана типа РСП-20. Наиболее подходящим под требуемый вращающий момент является мотор-редуктор NMRV-30 (рисунок 12, таблица 1).



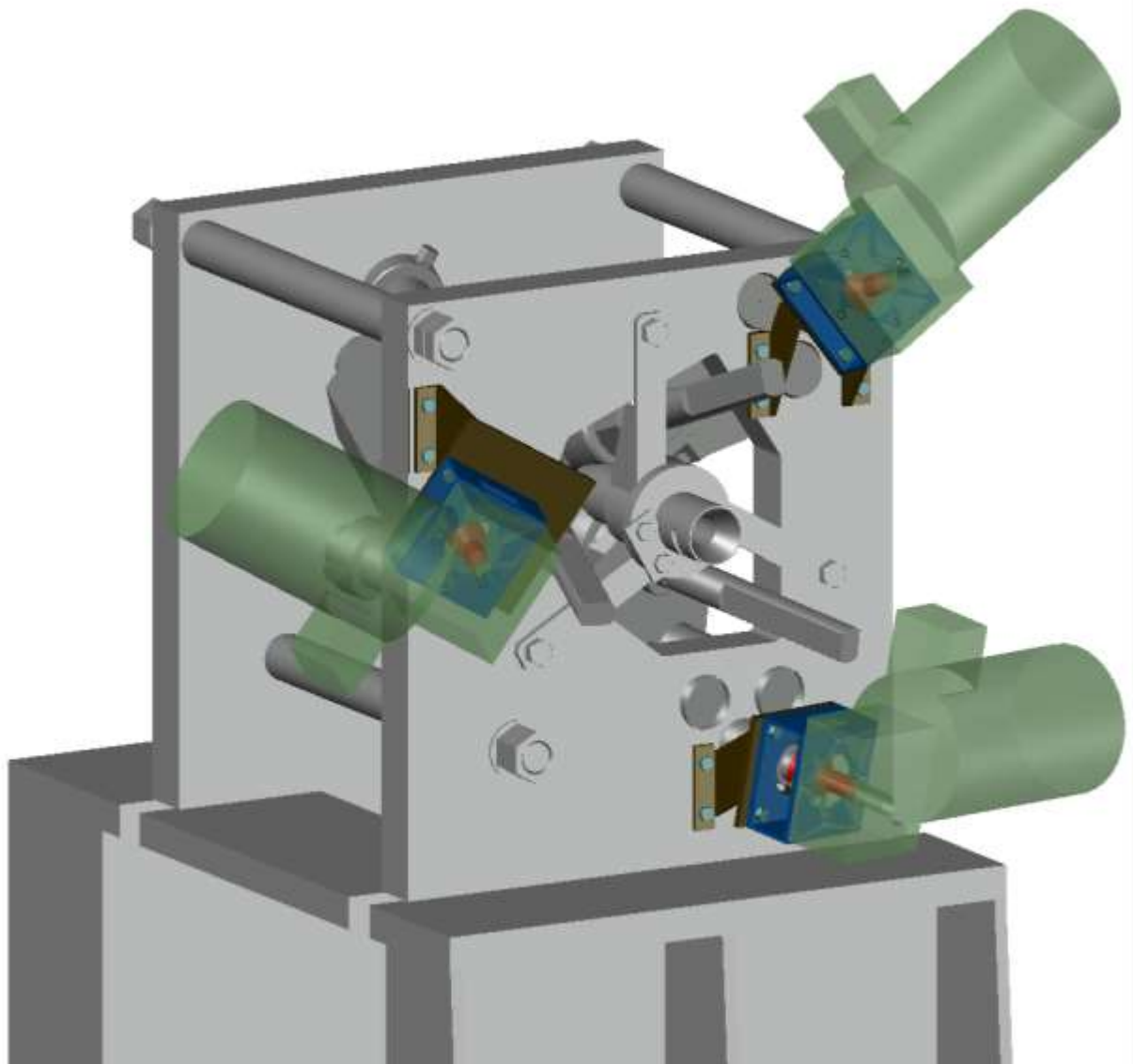


Рисунок 13. Установка кронштейнов и мотор-редукторов

### 3.2 Прочностной анализ разработанной конструкции

Далее необходимо определить выдержат ли кронштейны массу работающих мотор-редукторов.

При помощи современных систем инженерного анализа, таких как SolidWorks с приложением Simulation мы можем быстро и довольно точно исследовать на прочность разработанную конструкцию. Использовать в расчете целиком рабочую клеть нецелесообразно, так как нас интересует

только кронштейны и их крепления, поэтому в расчетной модели убраны все лишние детали, за исключением тех деталей, которые соединяют плиты и вместе с ними создают опору для кронштейнов. Для имитации работы электродвигателей задаем момент равный 14,21 Нм на винты, а также задаем силу тяжести с  $G = -9,81 \text{ м/с}^2$  для учета веса электродвигателей. В результате расчета видим небольшие участки на лапах кронштейнов с напряжением 20 МПа, в целом же нагрузка на кронштейны незначительна. Из этого делаем вывод, что конструкция таких кронштейнов работоспособна и способна выдержать вес работающих электродвигателей. Визуализация напряжений показана на рисунках 14 и 15.

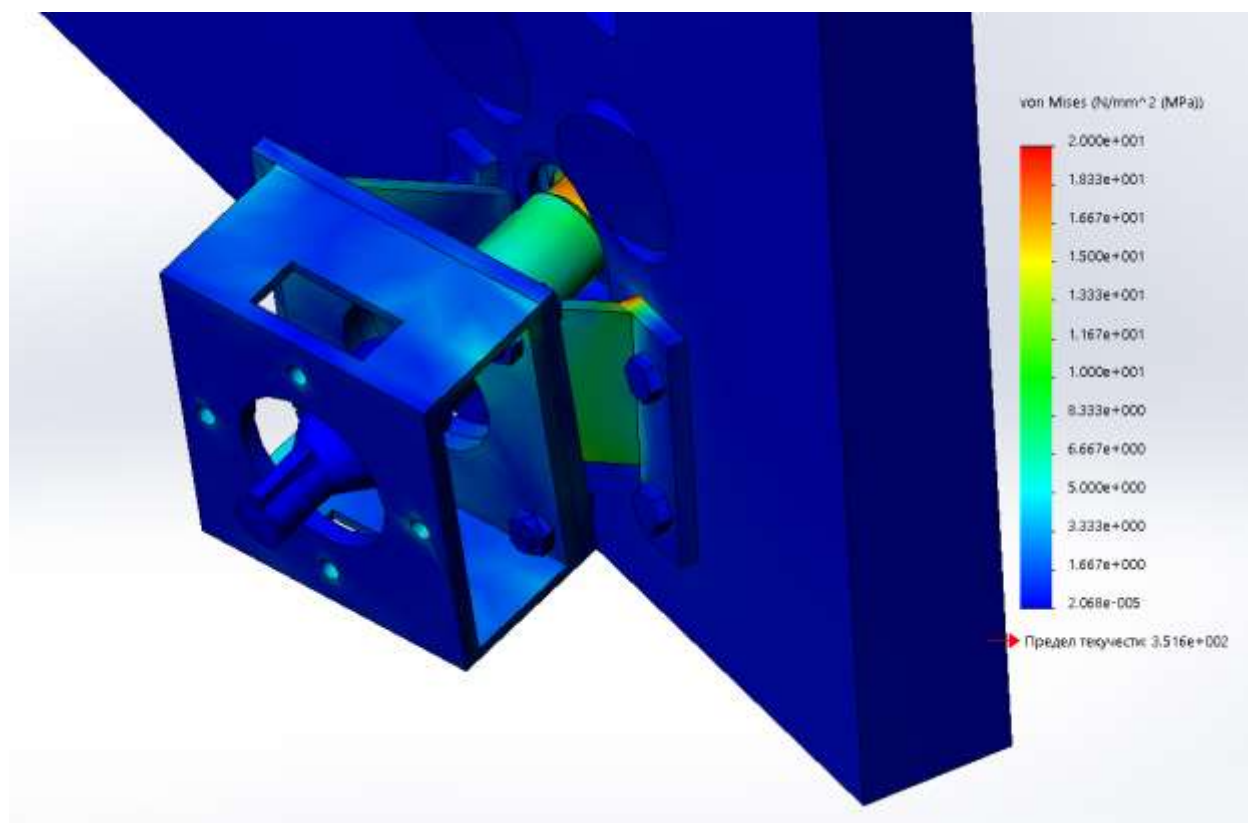


Рисунок 14. Вид на нижний кронштейн без отображения мотор-редуктора

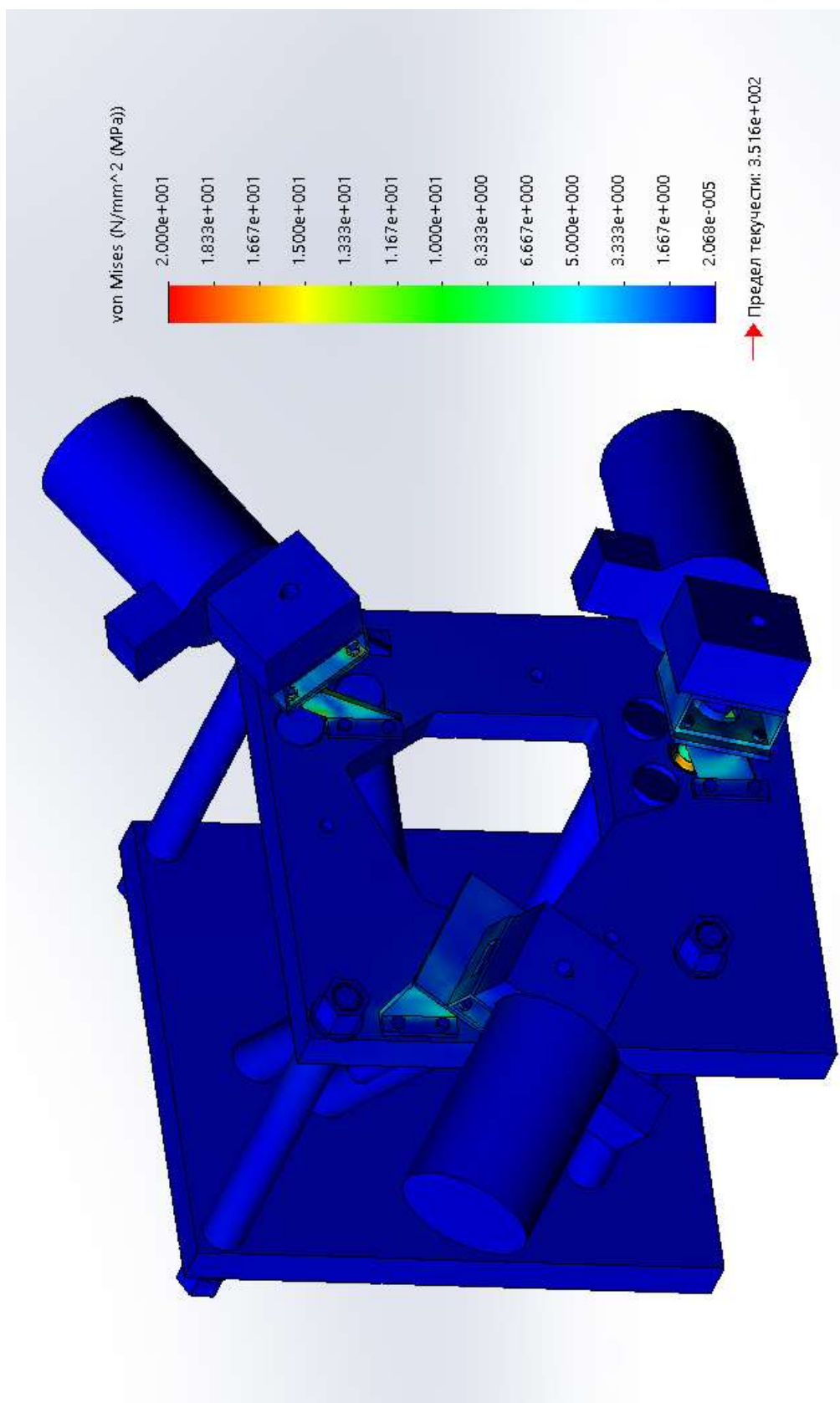


Рисунок 15. Общий вид на рабочую клетку с приводом винтов

### 3.3 Принцип работы АСУ

#### 3.3.1 Определение АСУ крайнего положения узла валка

Для определения АСУ крайнего положения узла валка необходимо установить на кольца концевые выключатели, таким образом, чтобы контактирующая поверхность выключателя была параллельна ближайшей поверхности подушки (Рисунок 16) и располагалась таким образом, чтобы при контакте подушка достигала крайнего возможного положения.

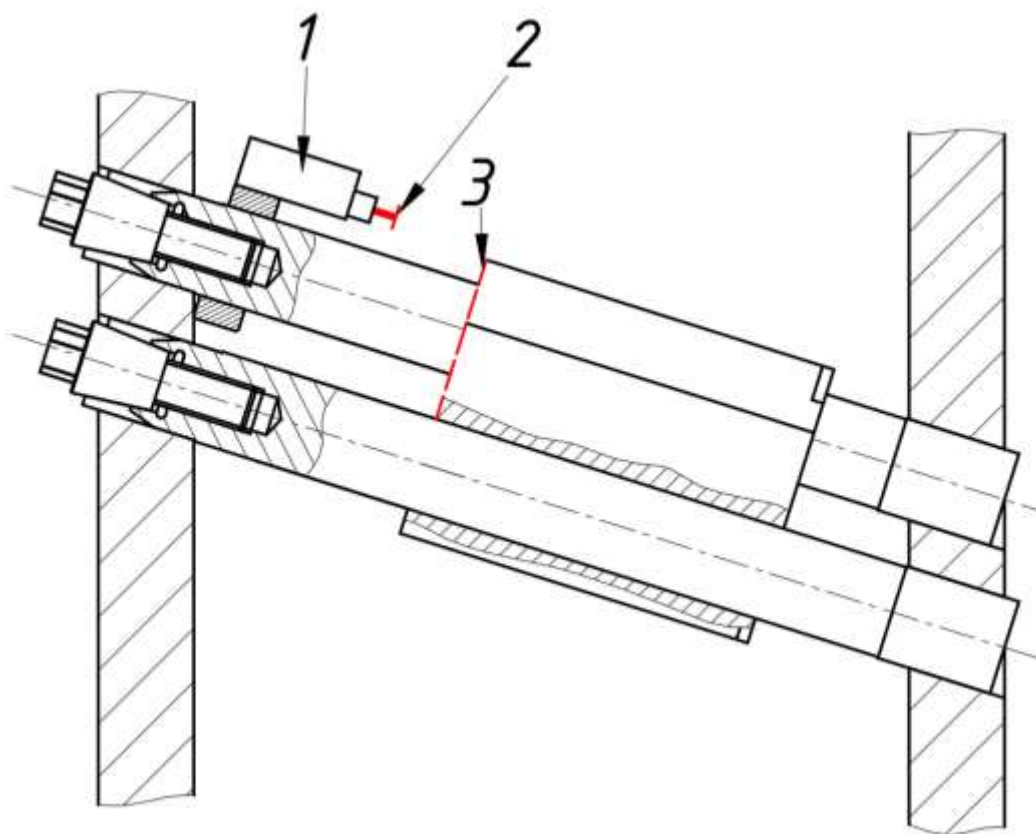


Рисунок 16. Схема установки концевого выключателя:

1 – концевой выключатель; 2 – поверхность контакта концевого выключателя; 3 – поверхность контакта подушки.

### 3.3.2 Порядок работы АСУ

Оператор вводит диаметр, который требуется получить после прохода заготовки, АСУ синхронно запускает мотор-редукторы, которые в свою очередь приводят во вращение винты, и направляют узлы валка вдоль колонн в сторону концевого выключателя, узлы валка приводятся в движение до тех пор, пока не происходит контакт с конечным выключателем. Как только происходит контакт, конечной выключатель посылает сигнал АСУ, сообщая о достижении валкового узла крайнего положения и работа соответствующего мотор-редуктора останавливается. Таким образом, все три валковых узла достигают крайнего положения. Вместе с этим данные, введенные оператором, пересчитываются АСУ в определенное количество оборотов мотор-редуктора. Далее происходит вращение уже в обратную сторону. Тем самым после достижения крайнего положения узлы валка движутся в обратном направлении на определенное расстояние от крайнего положения. После производства нужного числа оборотов АСУ останавливает мотор-редукторы. Тем самым узлы валка занимают нужное положение, и достигается требуемый зазор между валками.

### 3.3.3 Требования предъявляемые к АСУ

1. Настройка должна осуществляться с требуемой точностью с первого раза.
2. Погрешность настройки не более  $\pm 0,5$  мм.
3. Интерфейс системы должен быть интуитивно понятным.
4. АСУ должна иметь возможность расширения и модернизации, например возможность внедрения и задействования новых датчиков.

#### 4. ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ СТАНА

Целесообразно будет начать моделирование стана с основного объекта нашего исследования – рабочей клетки. Перед тем как начать измерять все размеры деталей клетки для построения модели, необходимо провести частичный демонтаж узлов и деталей стана. Демонтажу подверглись проводки и пара колонн с посаженным на них узлом валка. Демонтировать два оставшихся узла валка не имеет смысла, так как они являются унифицированными, следовательно, измерив размеры деталей одного узла, можно построить трехмерную модель всех трех узлов. После частичного демонтажа, был произведен разбор узлов, измерение всех размеров деталей и создание эскизов. По эскизам все элементы в программном комплексе AutoCAD 2018 были смоделированы по отдельности и сопряжены в сборочные единицы и узлы.

Особенностью клетки РСР-20 [3] является накрест лежащее расположение осей валков, углы между которыми жёстко заданы и определяются технологией. Важной задачей моделирования было определить углы, под которыми в пространстве располагаются валки, а вместе с валками и сами узлы валков, колонны, цилиндрические расточки в плитах.

Для решения этой задачи были построены черновые модели плит. На этапе моделирования плиты не имели конструктивных вырезов и цилиндрических расточек под колонны и винты, но полностью отвечали габаритным размерам оригинала и располагались на соответствующем оригиналу расстоянии друг от друга. Далее были определены координаты центров цилиндрических расточек на поверхности плит. Так как на поверхности плиты расточка имеет вид неправильного эллипса, найти точный центр расточки затруднительно и без применения специального инструмента неизбежно будут получены погрешности до  $\pm 1$  мм. Чтобы максимально уменьшить итоговую погрешность в построении было принято решение уменьшить количество координатных точек (центров расточек) на плитах. Минимальное



необходимое для построения количество координатных точек равняется трем. Две точки отвечают за определение продольной оси одной колонны, а через оставшуюся третью будет проходить ось второй колонны. Далее был смоделирован шаблон узла валка с продольными осями колонн и винта, взаимное расположение данных осей полностью соответствует расположению осей оригинала. Данный шаблон был размещен по определенным координатным точкам на плитах. Затем определены координаты центральной оси, проходящей через центры проводок. Шаблон с осями был скопирован круговым массивом вдоль центральной оси (рисунок 17). Таким образом, были получены все необходимые координаты и оси колонн и винтов, выполнено оптимальное взаимное расположение осей и сделаны цилиндрические расточки в плитах.

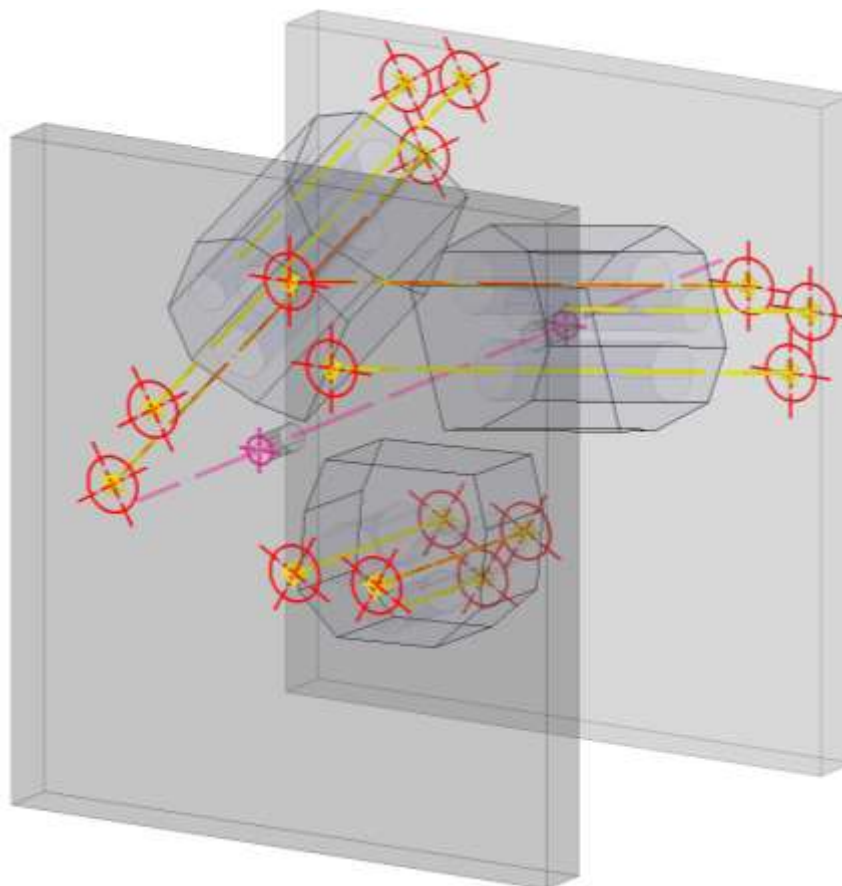


Рисунок 17. Определение координат расположения отверстий в плитах

Далее были смоделированы оставшиеся элементы конструкции и детали, которые были полностью собраны в рабочую клетку (рисунок 18, 19). Все размеры модели полностью соответствуют размерам оригинального стана.

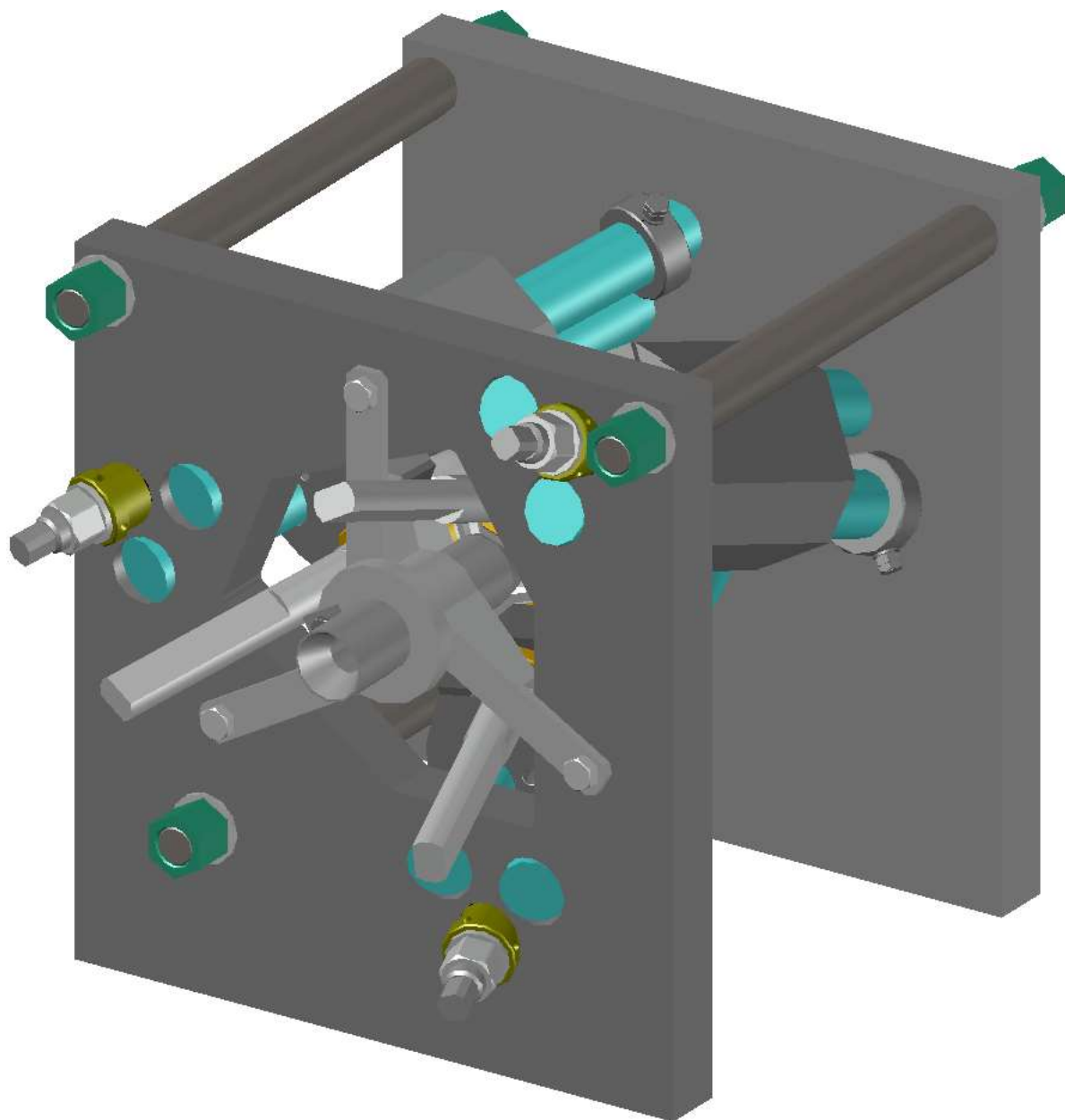


Рисунок 18. 3D-Модель рабочей клетки. Вид спереди

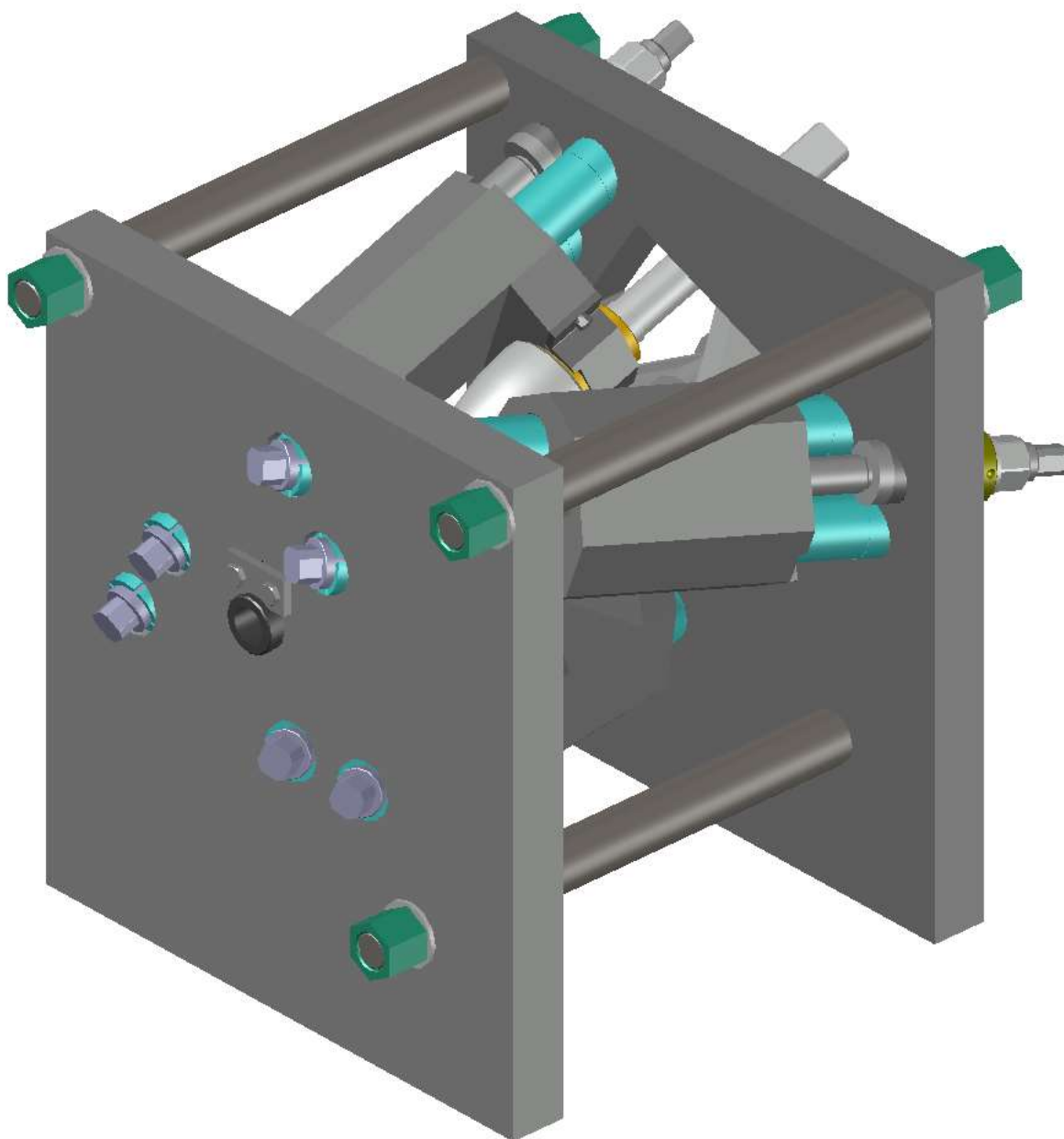


Рисунок 19. 3D-Модель рабочей клетки. Вид сзади

После этого были созданы модели мотор-редукторов, шпиндельного устройства и рам (рисунок 20). Так как первостепенной задачей исследования являлась конструкция рабочей клетки детализация оставшихся частей была ограничена точным отражением габаритных размеров, и достоверным внешним видом.

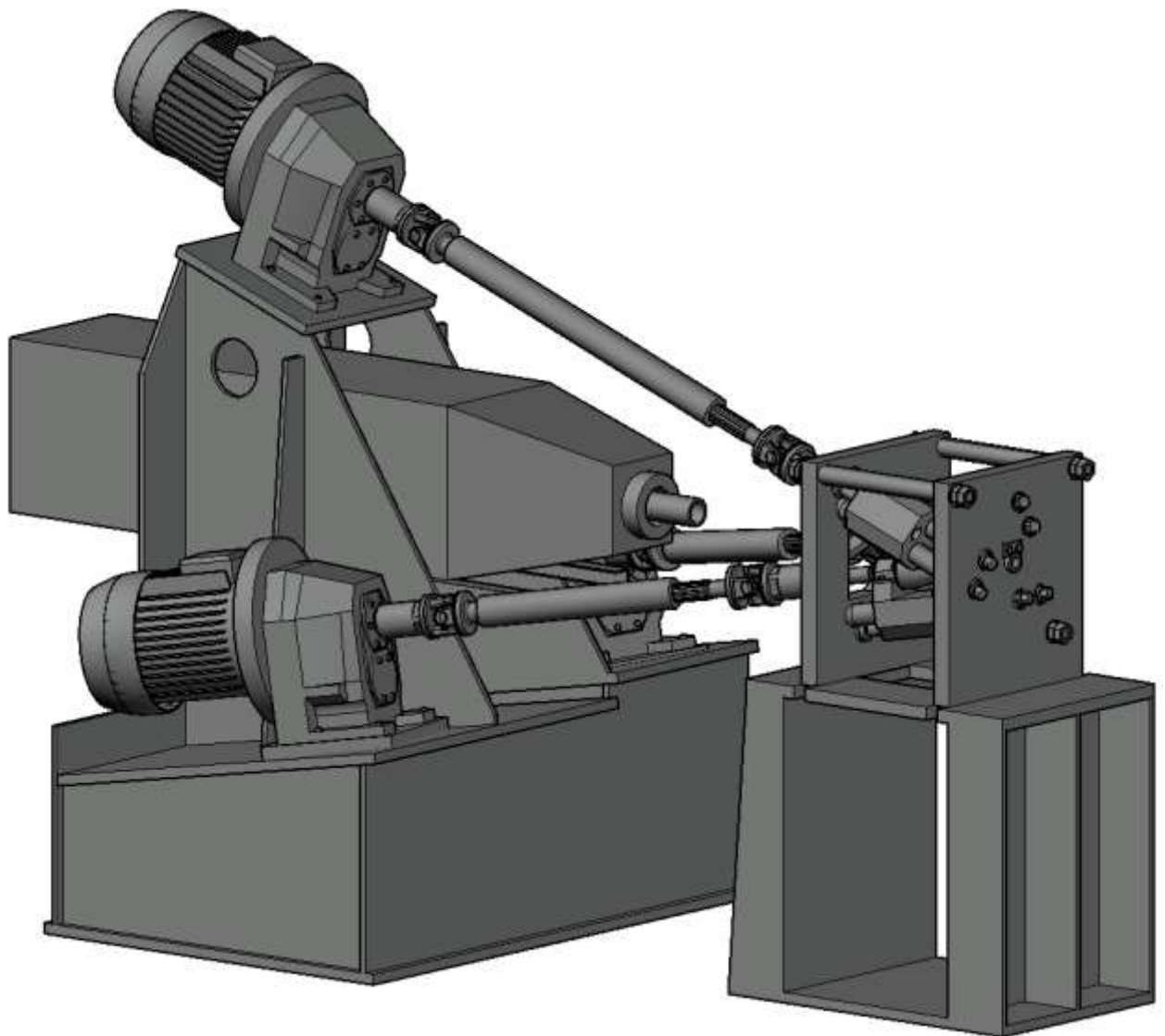


Рисунок 20. 3D модель стана поперечно-винтовой прокатки РСП-20

## 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ ПОД ПЕЧАТЬ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

В данной работе принято решение создать уменьшенную модель рабочей клетки стана РСП-20 с применением метода послойной наплавки пластика, такая модель может использоваться в учебных целях, для наглядной демонстрации конструкции и принципа работы рабочей клетки.

Печать методом послойного наплавления пластика позволяет достаточно точно воспроизводить модели реальных деталей машин, узлов, агрегатов. Но

зачастую приходится сталкиваться с необходимостью механической обработки печатных деталей, в частности трущихся деталей и их элементов (оси, втулки, зубья шестерни и т.п.), так как неизбежно возникают проблемы с усадкой, с качеством поверхности и т.п. А часть деталей и вовсе проблематично распечатать в работоспособном виде, особенно это касается мелких резьбовых деталей, подшипников и т.п. Прочностные свойства пластика позволяют использовать его, например, для корпусных деталей, но для крепежных деталей пластик не является надежным решением. Поэтому целесообразно применять в печатных моделях готовые металлические изделия и сборочные узлы.

Так как конструкция рабочей клетки стана включает в себя множество подвижных деталей и узлов, а также крепежных изделий, было решено применить в конструкции печатной модели стандартные металлические изделия, такие как гайки, болты, шпильки и т.д.

Некоторые детали рабочей клетки, например, колонны представляют собой вытянутые тела круглого сечения с короткими резьбовыми участками, ввиду проблематичности создания резьбовых соединений с применением пластика, принято решение использовать шпильку с насаженным на нее кожухом, представляющим собой напечатанную методом FDM трубку с внутренним диаметром равным диаметру шпильки. Это позволило создать гладкую цилиндрическую направляющую для скольжения узлов валков. Таким образом, мы получили комбинированную деталь с резьбовыми участками на концах. Такую деталь невозможно закрепить предусмотренным в оригинальной конструкции способом (см. рисунок 3). Поэтому способ крепления был переработан (рисунок 21) Такая конструкция колонн и способ их крепления, дополнительно стягивает между собой плиты, что делает конструкцию всей клетки более жесткой и прочной. К недостаткам такой конструкции можно отнести невозможность демонтажа колонн по отдельности.

Часть деталей оригинальной клетки преимущественно с целью сокращения механической обработки, а также созданием большего запаса прочности изготавливались в довольно неэкономном по массе виде. Зачастую дешевле оставить на детали лишние участки с материалом, чем затратным образом убирать их, например путем фрезерования. В случае послойного наплавления всю лишнюю массу можно убрать в процессе моделирования и не сталкиваться с проблемой неэкономичности. Многие детали модели были оптимизированы и в их конструкции применены элементы с более сложными формами, добавлены различные вырезы и грани. Одним из примеров оптимизации могут послужить плиты, представленные на рисунке 22 и 23. Вдобавок убраны те элементы, которые были необходимы для неразборного соединения деталей, такие детали теперь печатаются в виде единого целого.

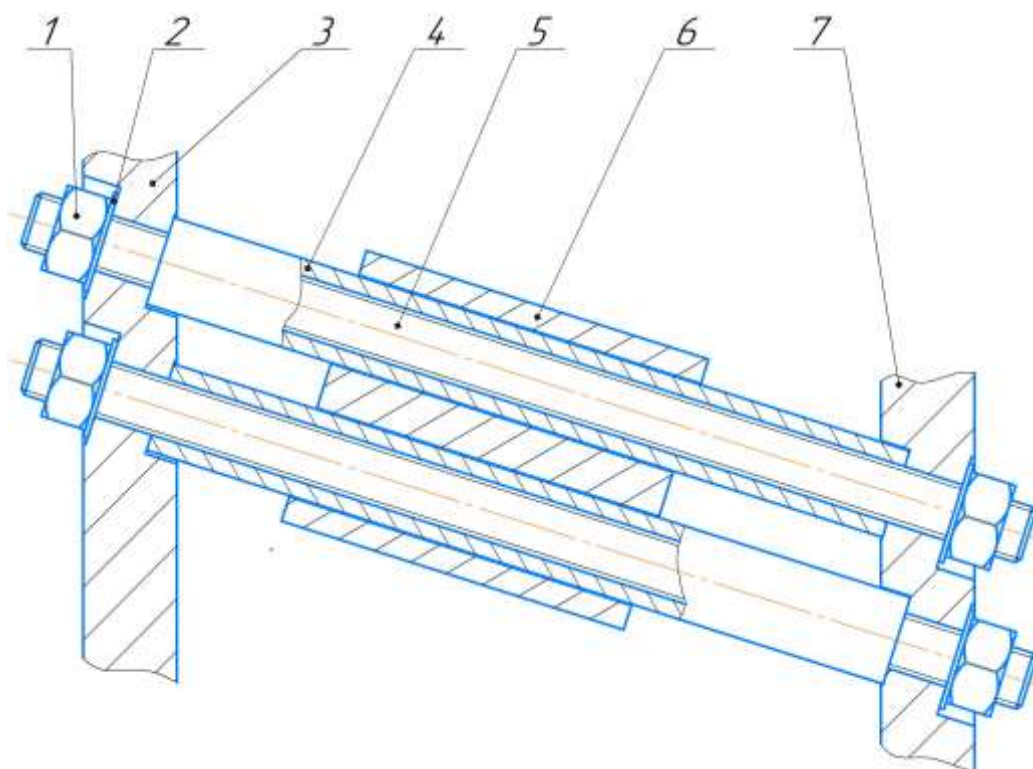


Рисунок 21. Крепление колонн в плитах печатной модели рабочей клетки:  
1 – гайка М12; 2 – шайба М12; 3, 7 – плиты; 4 – трубка; 5 – шпилька М12;  
6 – подушка.

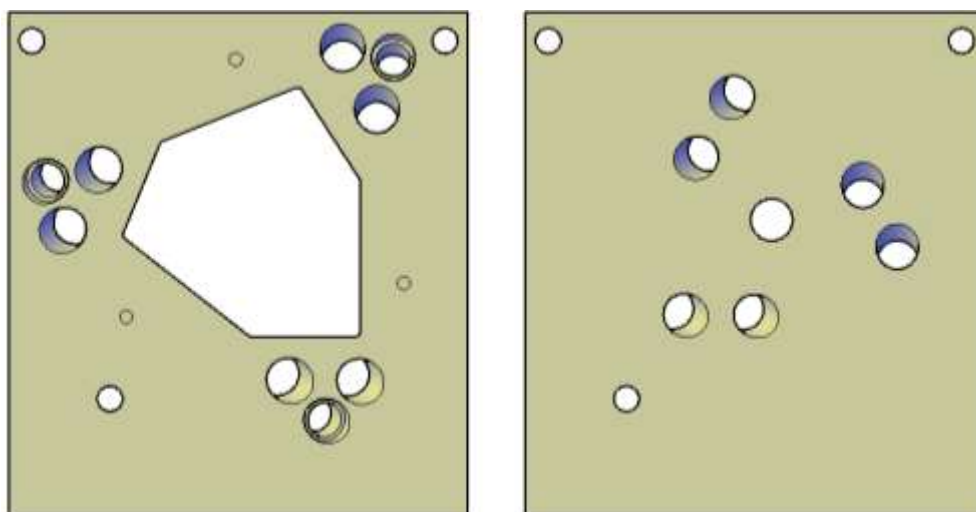


Рисунок 22. Плиты рабочей клетки стана

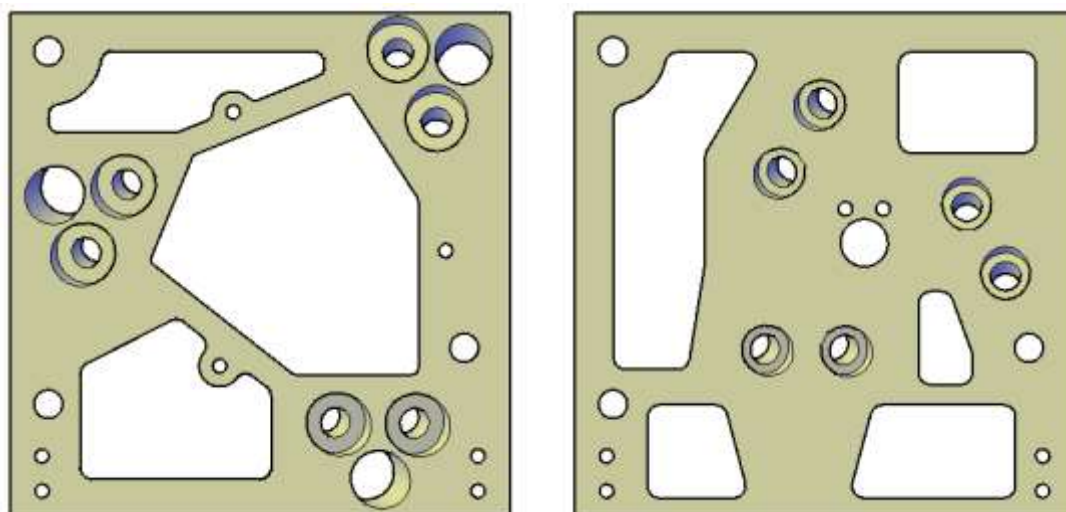


Рисунок 23. Плиты рабочей клетки печатной модели рабочей клетки

В конструкции рабочей клетки применяются достаточно много стандартных изделий, в частности деталей с резьбой такие, например, как болты и гайки.

Болты и гайки, созданные методом FDM-печати, имеют ограничения по размерам, прочности, моменту затяжки. И для создания надежной и работоспособной конструкции не подходят. Поэтому было принято решение использовать в конструкции печатной модели стандартные детали и металлические изделия с максимально возможной унификацией:



Стандартные изделия, применяемые в конструкции печатной модели:

- Гайки М12 (24 штуки)
- Фланцевые гайки М12 (3 штуки)
- Шайбы М12(27 штук)
- Пружинные шайбы М12 (3 штуки)
- Болты М6 (13 штук)
- Гайки М6 (13штук)
- Шайбы М6 (13 штук)
- Винты М4 (14 штук)
- Гайки М4 (14 штук)
- Шайбы М4 (24 штуки)
- Подшипники качения 80101  
(3 штуки)

Детали, применяемые в конструкции печатной модели:

- Шпильки М12 (длина 225)  
(9 штук)
- Шпильки М12 (длина 150)  
(3 штуки)

В результате была спроектирована трёхмерная модель рабочей клетки стана, собранная из деталей, адаптированных под 3D печать (рисунок 24, 25).

Далее, каждая деталь сборки была отдельно распечатана FDM методом. После производства часть деталей подверглась механической обработке с целью удаления поддержки. Затем была произведена сборка узлов и окончательная сборка модели рабочей клетки (рисунок 26, 27)



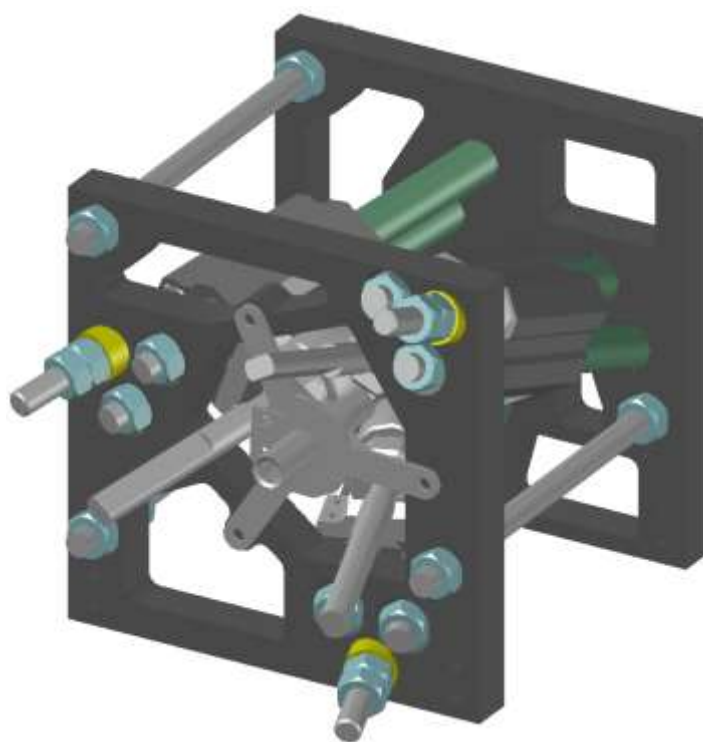


Рисунок 24. Трехмерная модель рабочей клетки адаптированная под печать

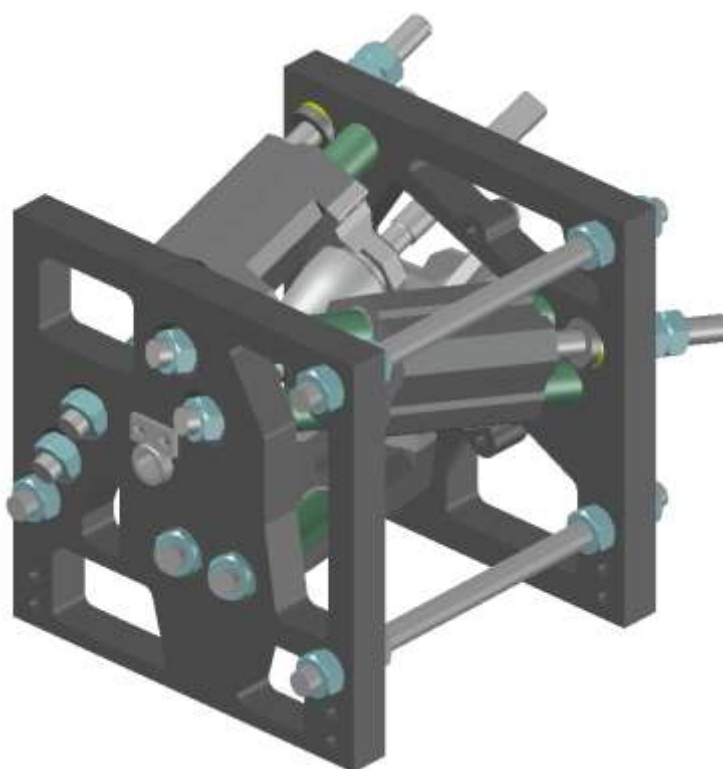


Рисунок 25. Трехмерная модель рабочей клетки адаптированная под печать



Рисунок 26. Модель рабочей клетки после сборки

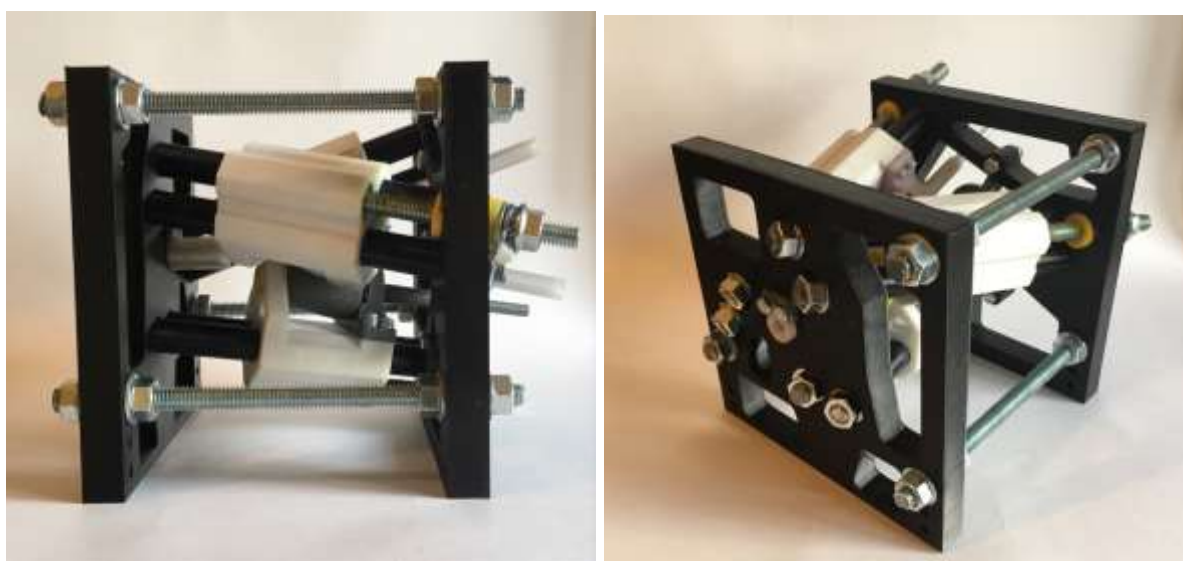


Рисунок 27. Модель рабочей клетки после сборки

Печать деталей конструкции осуществлялась на установке Anycubic 4 max, для печати использовался пластик PETG, сочетающий в себе достоинства более распространённых в 3D печати пластиков PLA и ABS и лишённый их основных недостатков. PETG имеет низкую термоусадку, что позволило обеспечить качественное сопряжение всех поверхностей с их минимальной

постобработкой. Готовая модель имеет массу 3550 г и габариты 272 x 206 x 198 мм. Данная модель отражает принцип работы и конструкцию рабочей клетки стана РСП-20 и может использоваться для наглядной демонстрации принципа работы и настройки рабочей клетки стана.

Так же соблюдена возможность демонтажа. Сохранен принцип агрегатной и унификации примененный в оригинальной конструкции.

## 6. ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ

Решено произвести расчет рабочей клетки в программе SolidWorks 2016 с использованием приложения Simulation.

Для оптимизации расчета и экономии времени детали и сборочные единицы, не являющиеся силовыми элементами конструкции, в расчете не использовались. С целью избегания сбоя, генерация сетки для каждой детали осуществлялась в индивидуальном порядке (рисунок 20).

Для того что бы провести расчет конструкции, определим давление, усилие прокатки, а также геометрические параметры пятна контакта.

Определим длину контакта во входном и выходном конусах очага деформации [6]:

$$l_1 = \frac{d_3 - d_0}{2\operatorname{tg}\alpha_1} \quad (3);$$

$$l_1 = \frac{20 - 15}{0,316} = 15,82 \text{ мм};$$

$$l_2 = \frac{d_0}{2\operatorname{tg}\alpha_2} \quad (4);$$

$$l_2 = \frac{15}{0,388} = 38,66 \text{ мм},$$

где  $d_3 = 20$  мм – диаметр заготовки;

$d_0 = 15$  мм – расстояние между валками в пережиме;

$\alpha_1 = 9^\circ$  - угол входного конуса валка;

$\alpha_2 = 11^\circ$  - угол выходного конуса валка.

Определим общую длину контактной поверхности [6]:

$$l = l_1 + l_2 \quad (5);$$

$$l = 15,82 + 38,66 = 54,48 \text{ мм}.$$

Разобьем общую длину контактной поверхности на  $n = 5$  участков длиной  $\Delta l = 10,896 \text{ мм}$

Рассчитаем ширину контактной поверхности для каждого участка [6]

$$b_x = \sqrt{\frac{2R_x \cdot r_x \cdot \Delta r_x}{R_x + r_x}} \quad (6),$$

где  $R_x$  – радиус валка в сечении  $x - x$ , мм;

$r_x$  – радиус заготовки в сечении  $x - x$ , мм;

$\Delta r_x$  – абсолютное обжатие заготовки в сечении  $x - x$ , мм.

$$b_1 = 3,94 \text{ мм};$$

$$b_2 = 4,37 \text{ мм};$$

$$b_3 = 5,5 \text{ мм};$$

$$b_4 = 5,46 \text{ мм};$$

$$b_5 = 5,41 \text{ мм}.$$

Рассчитаем площадь контактной поверхности [6]:

$$F = \sum \left( \frac{b_x + b_{x+1}}{2} \right) \cdot \Delta l \quad (7),$$

$$F = 134,45 \text{ мм}^2.$$

Вычислим среднее давление [6]:

$$p_{\text{cp}} = 2 \cdot \sigma_s \cdot \left( 1,25 \cdot \ln \frac{2r}{b} + 1,25 \cdot \frac{b}{2r} - 0,25 \right) \quad (8),$$

где  $\sigma_s = 125$  МПа – сопротивление деформации заготовки [7],

$b = 4,9$  мм – ширина контактной поверхности,

$r = 10$  мм – радиус заготовки.

$$p_{\text{cp}} = 450 \text{ МПа}$$

Определим полное усилие на валок [4]:

$$P = p_{\text{cp}} \cdot F \quad (9);$$

$$P = 60,5 \text{ кН}.$$

Введем полученные данные в систему, зададим крепления, обозначим связи, зададим нагрузку и выполним расчет. Для наглядной визуализации напряжений на модели зададим масштаб в 80 МПа (рисунок 28).

Наиболее нагруженными участками являются крышки валкового узла, места стыков колонн с плитами, и колонн с подушками. Напряжения на этих участках доходят до 150 МПа (Рисунок 29, 30).



Рисунок 28. Сборка рабочей клетки, подготовленная к расчетам

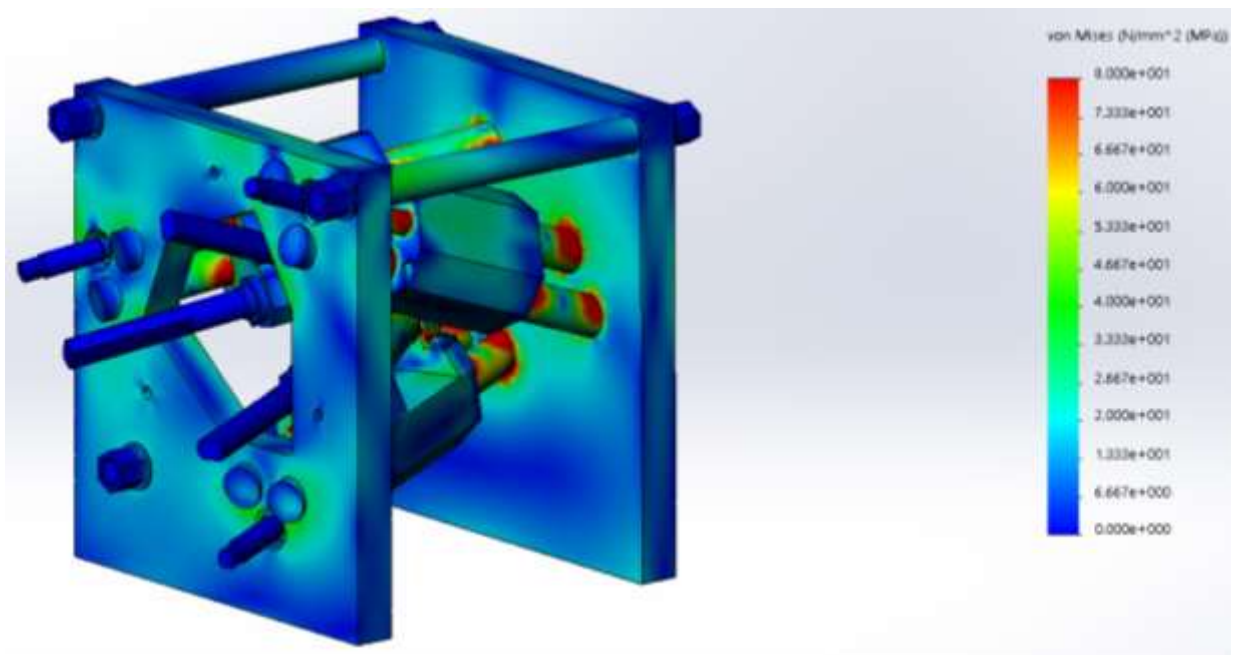


Рисунок 29. Визуализация напряжений в рабочей клетки

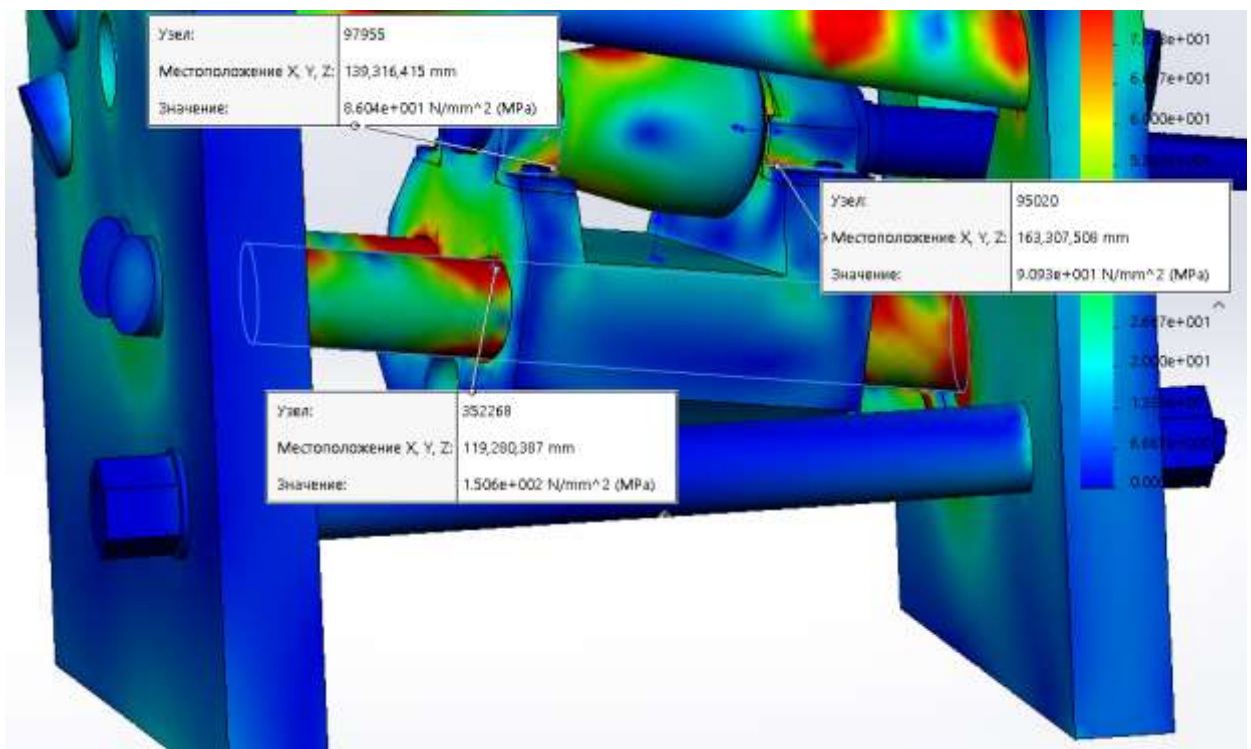


Рисунок 30. Участки с максимальными напряжениями

## 7. МАРШРУТНО-ОПЕРАЦИОННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «ВИНТ»

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ

00 Заготовительная операция (круглый прокат) (Рисунок 31)

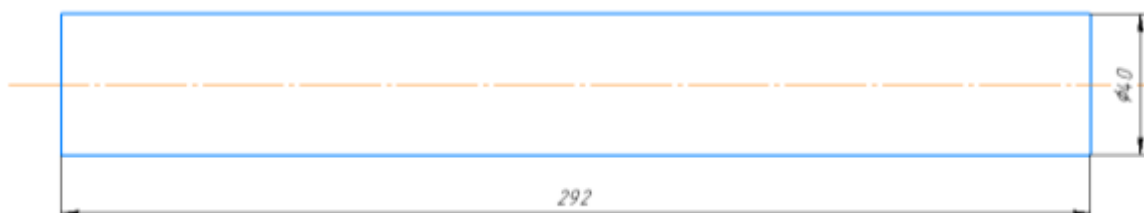


Рисунок 31. 00 Заготовительная операция (круглый прокат)

05 Токарная операция

### ОПЕРАЦИОННАЯ КАРТА ДЛЯ ТОКАРНОЙ ОПЕРАЦИИ (таблица 2)

Таблица 2. Операционная карта для токарной операции

Установ	№	Содержание операции
А	01	Сверлить отверстие 1. РИ Центровочное сверло R5. Токарный станок 1К62
Б	02	Сверлить отверстие 2. РИ Центровочное сверло R5. Токарный станок 1К62
	03	Продольный суппорт. Точить поверхность 3. РИ Подрезной резец ВК8 ГОСТ 18880-73. Токарный станок 1К62
	04	Продольный суппорт. Точить канавки 4. РИ Подрезной резец ВК8 ГОСТ 18880-73. Токарный станок 1К62
	05	Продольный суппорт. Точить поверхность 5. РИ Подрезной резец ВК8 ГОСТ 18880-73. Токарный станок 1К62



Продолжение таблицы 2

Установ	№	Содержание операции
	06	Продольный суппорт. Точить канавки. Поверхность 6. РИ Канавочный резец ВК8 ГОСТ 18880-73. Токарный станок 1К62
	07	Продольный суппорт. Точить поверхность 7. РИ Подрезной резец ВК8 ГОСТ 18880-73. Токарный станок 1К62
	08	Поперечный суппорт. Точить фаску 8. РИ отогнутый проходной резец ГОСТ 18880-73. Токарный станок 1К62

1 установ (рисунок 32)



Рисунок 32. 1 установ

2 установ (рисунок 33)



Рисунок 33. 2 установ



1 переход (рисунок 34)

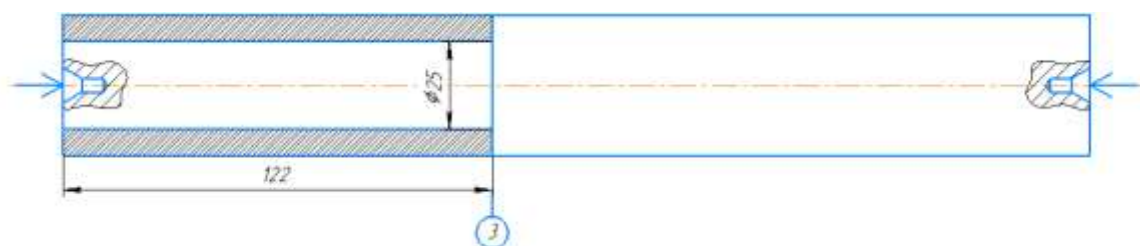


Рисунок 34. 1 переход

2 переход (рисунок 35)

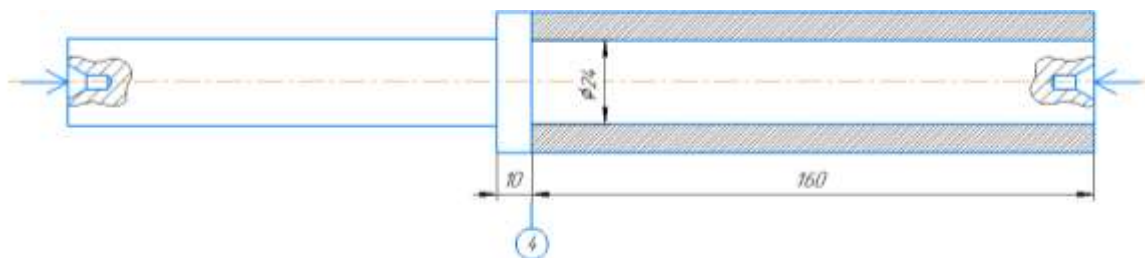


Рисунок 35. 2 переход

3 переход (рисунок 36)

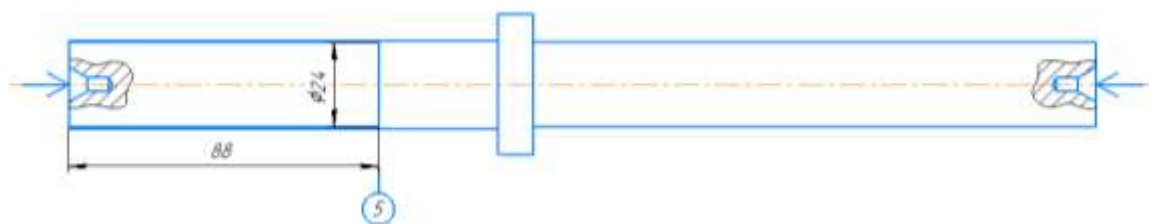


Рисунок 36. 3 переход

4 переход (рисунок 37)

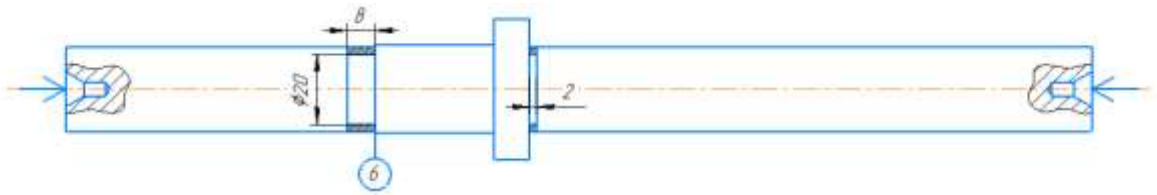


Рисунок 37. 4 переход

5 переход (рисунок 38)

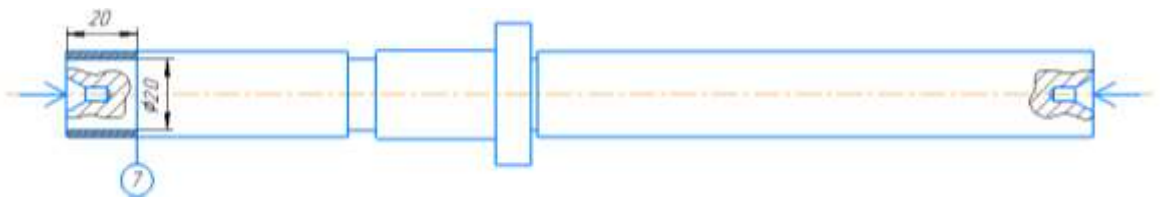


Рисунок 38. 5 переход

6 переход (рисунок 39)

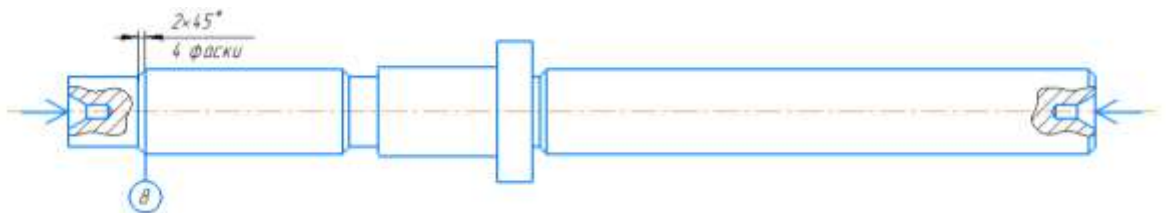


Рисунок 39. 6 переход

## 10 Токарно-винторезная операция

### ОПЕРАЦИОННАЯ КАРТА ДЛЯ ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОЙ ОПЕРАЦИИ (таблица 3)

Таблица 3. Операционная карта для токарно-винторезной операции

Установ	№	Содержание операции
А	01	Нарезать резьбу. РИ Резец 2660-0003 2 Т15К6 ГОСТ 18885-73

1 установ (рисунок 40)

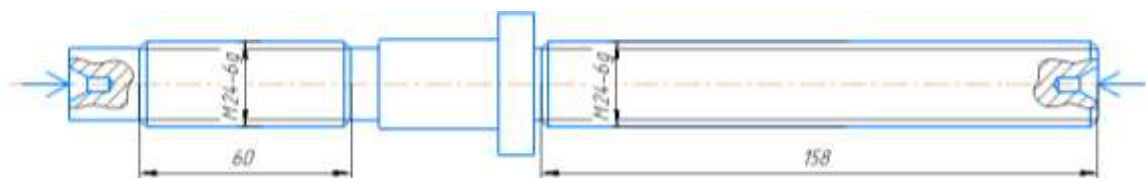


Рисунок 40. 1 установ

## 15 Горизонтально-фрезерная операция

### ОПЕРАЦИОННАЯ КАРТА ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ (таблица 4)

Таблица 4. Операционная карта для горизонтально-фрезерной операции

Установ	№	Содержание операции
А	01	Фрезеровать размер 1. РИ Фреза 2214-0357 ГОСТ 26595-85
	02	Фрезеровать размер 2. РИ Фреза 2214-0357 ГОСТ 26595-85

1 установ

1 переход (рисунок 41)

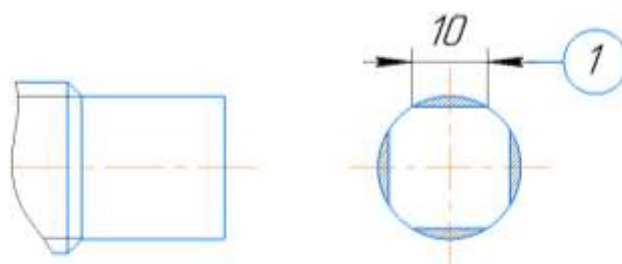


Рисунок 41. 1 переход

2 переход (рисунок 42)

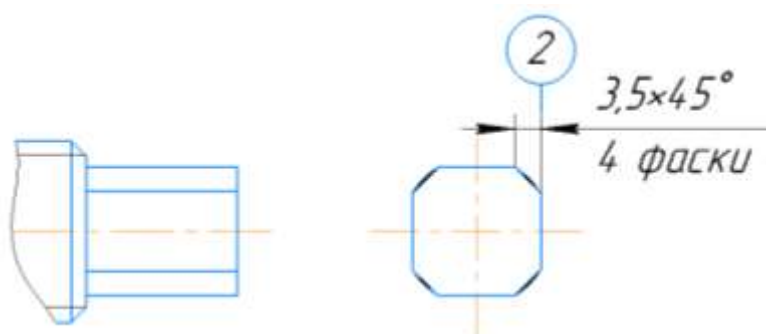


Рисунок 42. 2 переход

20 Термическая операция. Закалка ТВЧ

ОПЕРАЦИОННАЯ КАРТА ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ (таблица 5)

Таблица 5. Операционная карта для термической операции

Установ	№	Содержание операции
А	1	Закалка ТВЧ. Установка ТВЧ ВЧ-100АВ

## 25 Круглошлифовальная операция

### ОПЕРАЦИОННАЯ КАРТА ДЛЯ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНОЙ ОПЕРАЦИИ (таблица 6)

Таблица 6. Операционная карта для круглошлифовальной операции

Установ	№	Содержание операции
А	01	Шлифовать поверхность выдерживая размер 1 РИ Круг шлифовальный 50x20x13 тип 1 ГОСТ 24-2483

1 установ (рисунок 43)

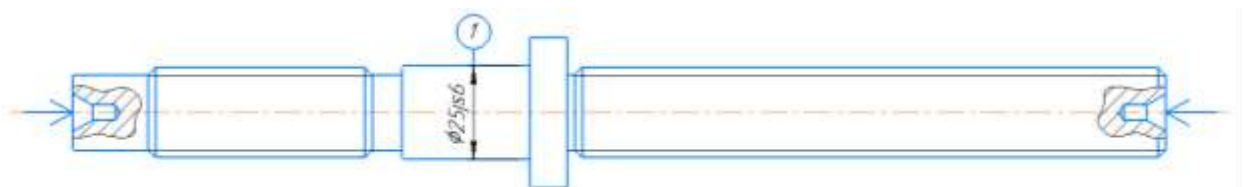


Рисунок 43. 1 установ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выпускной квалификационной работы описана конструкция и принцип работы лабораторного трехвалкового стана РСП-20, проведен обзор аналогичных конструкций, разработан вариант автоматизации настройки рабочей клетки, рассмотрены особенности создания трехмерной модели рабочей клетки, проведена оптимизация трехмерной модели рабочей клетки под печать методом послойной наплавки. Создана уменьшенная модель рабочей клетки с применением деталей распечатанных FDM-методом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. Рабочая клеть стана поперечно винтовой прокатки/ В.А. Усов, В.Г. Бородин, Б.И. Тартаковский, И.К. Тартаковский, В.В. Курдюков.  
Коновалов, Ю.В. Этапы развития мелкосортных, проволочных станов и литейно-прокатных агрегатов для производства мелкого сорта и катанки / Ю. В. Коновалов, А. Г. Маншилин, М. Г. Коренко // МЕТАЛЛ И ЛИТЬЁ УКРАИНЫ № 7 (266) '2015
3. Исследование поперечно-винтовой прокатки на стане РСП-20 / Г.И. Коваль; Юж.-Урал. гос. ун-т, Каф. Обраб. металлов давлением ; ЮУрГУ, Челябинск : Издательский Центр ЮУрГУ , 2008
4. Червячный мотор-редуктор NMRV-030 – <https://tehprivod.su/katalog/motor-reduktory/chervyachnye-motor-reduktory/chervyachnye-motor-reduktory-nmr/030.html>
5. Электродвигатель АИС56В4 – [http://www.esbk.ru/products\\_info/ed/101\\_2\\_ed\\_euro/elektrodivigatel\\_ais\\_56b4.html](http://www.esbk.ru/products_info/ed/101_2_ed_euro/elektrodivigatel_ais_56b4.html)
6. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката. Учебник для вузов / Целиков А. И., Попухин П. И., Гребеник В. М. и др. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургии. 1988. 680 с.
7. Технологическая деформируемость титановых сплавов / В.И. Крайнов, В.С. Кропачев. Южно-Уральский государственный университет, Челябинск Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15, № 2. С. 115–119