

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Троицкий Даниил Владимирович

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТРЁХВАЛКОВЫХ КЛЕТЕЙ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ  
КОМПЬЮТЕРНОГО ИНЖИНИРИНГА И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
к.т.н. Гамин Юрий Владимирович

Москва - 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	10
1.1 Современные методы инжиниринга металлургического оборудования.....	10
1.1.1 Метод параметрического моделирования.....	10
1.1.2 Метод топологической оптимизации .....	13
1.2 Анализ конструктивных особенностей трёхвалковых клетей винтовой прокатки .....	18
1.2.1 Краткая история трёхвалковых клетей винтовой прокатки .....	18
1.2.2 Особенности конструкции трёхвалковых клетей винтовой прокатки .....	25
1.3 Выводы по главе 1.....	35
ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	38
2.1 Постановка цели и задач исследования .....	38
2.2 Выбор метода автоматизированного проектирования и САД системы.....	39
2.3 Выбор методологии проектирования в программной среде.....	40
2.3.1 Общая методология программного проектирования сплошных тел и моделей .....	40
2.3.2 Методология горизонтального моделирования.....	41
2.3.3 Методология моделирования с явными ссылками.....	43
2.3.4 Методология устойчивого моделирования .....	45
2.4 Методика построения валкового узла от очага деформации.....	46
2.4.1 Методика построения геометрии пространственного положения валков продольного профиля.....	46
2.4.2 Пример расчёта калибровки валка по очагу деформации .....	47
2.4.3 Автоматизация методики виртуальных пережимов в САД-системе .....	49
2.5 Выводы по главе 2.....	55
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЁХВАЛКОВОЙ КЛЕТИ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ .....	57

3.1	Определение допущений и факторов при проектировании.....	57
3.2	Разработка алгоритма проектирования.....	59
3.2.1	Общий вид разработанного алгоритма проектирования .....	59
3.2.2	Формулировка общей концепции проектирования.....	61
3.2.3	Определение пространственной компоновки валковой группы.....	63
3.2.4	Определение и расчёт параметров валкового узла .....	64
3.2.4.1	Выбор схемы положения и настройки валков.....	65
3.2.4.2	Определение размеров входных и выходных опор, формирование подушек валков .....	67
3.2.4.3	Выбор типа подшипниковых опор .....	70
3.2.4.4	Формирование кассеты валка .....	75
3.2.5	Определение и расчёт параметров нажимного устройства.....	77
3.2.6	Определение и расчёт станины .....	82
3.2.7	Построение общей модели рабочей клетки и её параметризация .....	85
3.4	Выводы по главе 3.....	89
ГЛАВА 4. ПРОВЕРОЧНЫЕ РАСЧЁТЫ ПОЛУЧЕННЫХ МОДЕЛЕЙ.....		90
4.1	Проверочные расчёты для валидации построенной модели.....	90
4.1.1	Расчёт нагрузок и ограничений.....	90
4.1.2	Проверка модели на устойчивость.....	95
4.1.3	Проверка полученных моделей под нагрузками .....	99
4.1.4	Сводный анализ произведённых расчётов .....	101
4.4	Выводы по главе 4.....	105
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ И РАЗРАБОТКА ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИ.....		106
5.1	Сравнение с существующими аналогами .....	106
5.2	Разработка процесса перевалки валков рабочей клетки .....	111
5.3	Разработка шаблонов для генерации конструкторской документации .....	112
5.4	Выводы по главе 5.....	115
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ .....		116

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	129

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы**

Современное промышленное металлургическое оборудование, в частности, прокатные станы и агрегаты являются сложными техническими системами. Конструкции, как правило, включают большое количество сопрягаемых узлов, деталей, вспомогательных устройств. В то же время такое оборудование должно обладать достаточной прочностью, долговечностью и надежностью. Проектирование прокатного оборудования является сложной и трудоемкой технической задачей, включающей несколько этапов: эскизное проектирование и расчеты, рабочее проектирование, проведение инженерных проверочных расчетов, оформление конструкторской документации на каждом этапе и т.д. Такая работа обычно выполняется несколькими отделами (конструкторскими и расчетными). Применение современных систем автоматизированного проектирования (САПР) позволило существенно снизить трудоемкость таких работ, сократить время некоторых этапов проектирования (CAD) и подготовки к производству (CAM). Дальнейшие тенденции развития цифрового проектирования направлены в сторону полной автоматизации расчетов, создания трехмерных моделей, сокращения временных затрат на разработку, проектирование и проверку, а также исключение ошибок.

Учитывая описанную выше проблематику и вектор совершенствования технических решений в области автоматизации процессов проектирования, задача по разработке автоматизированного алгоритма проектирования прокатного оборудования на основе современных методов инжиниринга и автоматизированного проектирования является актуальной.

### **Цель и задачи работы**

Целью диссертационной работы является разработка автоматизированного программного алгоритма проектирования рабочей клетки трехвалковой винтовой прокатки с применением современных методов инжиниринга и автоматизированного проектирования.

Для достижения цели в работе поставлены следующие основные задачи:

— проведение анализа существующих конструкций клеток винтовой прокатки и их особенностей на основании литературного обзора и патентного поиска;

— определение зависимостей размеров, формы и взаимного контакта между основными узлами и деталями рабочей клетки;

- выбор и компиляция расчетных методик для получения данных, необходимых для реализации проектирования и проведения проверочных расчетов;
- разработка алгоритма автоматизированного параметрического проектирования трёхвалковой клетки винтовой прокатки и создание с его помощью трехмерной параметрической модели рабочей клетки;
- проведение проверочных расчетов, проверка устойчивости модели и работоспособности алгоритма в условиях варьирования основных технологических параметров и входных данных;
- разработка комплекта преднастроенных шаблонов для автоматической генерации рабочей конструкторской документации (РКД) деталей и сборочных единиц клетки.

**Научная новизна** заключается в следующем:

- разработан поэтапный алгоритм автоматизированного параметрического проектирования, позволяющий существенно упростить эскизный этап проектирования и расчетов и применить принципы модульности и масштабирования в рамках нескольких типоразмеров трехвалковых клеток винтовой прокатки;
- впервые создана трехмерная параметрическая модель рабочей трехвалковой клетки винтовой прокатки с возможностью перестроения в широком диапазоне варьирования основных технико-технологических параметров (угол раскатки 5-15°, угол подачи 10-25°, диаметр заготовки 20-200 мм), и не требующая внесения изменений в чертежи и модели деталей;
- с помощью инструментов параметрического проектирования и расчетов на основе метода конечных элементов (МКЭ) получены зависимости геометрических параметров подшипниковых втулок и их прочности;
- скомпилирован обобщенный расчетный модуль для комплексного расчета и определения параметров проектирования трехвалковых клеток винтовой прокатки;
- получены данные о напряженно-деформированном состоянии и статической прочности сборочных 3D моделей клеток трех типоразмеров.

**Практическая значимость**

- Сокращение времени определения основных параметрических зависимостей при проектировании оборудования рабочей клетки и проведения предварительных расчетов за счет применения программно-расчетного модуля.

— Полученная трехмерная параметрическая модель клетки позволяет использовать ее для оперативной разработки на стадии эскизного проектирования под требования технического задания и реализации концепции унификации конструкции для различных типоразмеров.

— Параметрическая пространственная модель валков может быть использована для оперативной подготовки сборочных моделей, используемых в программных комплексах для компьютерного моделирования.

— Разработана трехмерная модель и чертежи универсальной конструкции трехвалковой клетки, обладающей сравнительно низкой массой (уменьшение массы на 15–65 % по сравнению с существующими аналогами), габаритами, металлоёмкостью и удобством перевалки рабочих валков.

— Полученные результаты работы частично используются на кафедре ОМД НИТУ МИСИС для проведения практических занятий и лабораторных работ в учебном процессе по направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» и 22.03.02 «Металлургия», а также в курсовом проектировании и при выполнении выпускных квалификационных работ студентов бакалавриата и магистратуры.

### **Методы исследований**

Методы исследований построены на знаниях о принципах проектирования в машиностроении, теории обработки металлов давлением, работы систем автоматизированного проектирования, а также технологии и теории горячей винтовой прокатки.

Программно-расчетный модуль скомпилирован с применением электронных таблиц Microsoft Excel.

Разработка и проектирование трехмерной параметрической модели рабочей трехвалковой клетки винтовой прокатки, а также проверочные прочностные расчеты выполнены с использованием программного обеспечения Autodesk Inventor.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Зависимости размеров, формы и взаимного контакта между основными узлами и деталями рабочей клетки, обеспечивающие корректную работу алгоритма в широких диапазонах варьирования входных данных.

2. Методика определения геометрических параметров подшипниковых втулок и их прочности на основе совмещения параметризации и метода конечных элементов.

3. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния модели трехвалковой клетки винтовой прокатки трех типоразмеров на основе метода конечных элементов.

4. Алгоритм автоматизированного параметрического проектирования трехвалковой клетки винтовой прокатки, разработанный на основе применения принципов модульности и масштабирования в рамках нескольких типоразмеров трехвалковых клеток винтовой прокатки.

### **Апробация работы**

Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Автоматизированные системы управления и информационные технологии (АСУИТ-2023)» (7–9 июня 2023 г., Пермский Политехнический Университет, г. Пермь).

### **Публикации**

Основные материалы диссертации представлены в 2 статьях, опубликованных в научных журналах, рецензируемых ВАК РФ:

1. **Троицкий Д.В.**, Гамин Ю.В., Галкин С.П., Будников А.С. Параметрическая модель трехвалкового узла мини-стана радиально-сдвиговой прокатки. **Известия вузов. Черная металлургия.** 2023;66(3):376–386. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-376-386>.

2. Гамин Ю.В., **Троицкий Д.В.**, Галкин С.П., Кин Т.Ю., Фадеев В.А. Алгоритм автоматизированного параметрического проектирования трехвалковой клетки радиально-сдвиговой прокатки. **Сталь.** 2024; 11:25–33.

### **Достоверность научных результатов**

Достоверность полученных научных результатов подтверждается применением современных программных комплексов САПР, сопоставлением полученных результатов с данными других авторов. Текст диссертации проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат».

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, в получении и анализе основных результатов, разработке параметрической трехмерной модели и программно-расчетного модуля, проведении проверочных расчетов.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа по своей цели, задачам, содержанию и научной новизне соответствует паспорту специальности 2.5.7. п. 6 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости деформирующего инструмента.», п. 7 «Оптимизация конструкций разрабатываемых кузнечных, прессовых, штамповочных, прокатных и волочильных машин, их взаимосвязь со средствами автоматизации и механизации».

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, а также списка литературы из 103 источников. Работа изложена на 129 страницах, содержит 64 рисунка, 8 таблиц и 2 приложения.

## ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

### 1.1 Современные методы инжиниринга металлургического оборудования

Современное промышленное металлургическое оборудование, в частности, прокатные станы и агрегаты являются сложными техническими системами. Конструкции, как правило, включают большое количество сопрягаемых узлов, деталей, вспомогательных устройств. В то же время такое оборудование должно обладать прочностью, долговечностью и надежностью. Проектирование прокатного оборудования является достаточно сложной технической задачей, включающей несколько этапов: эскизное проектирование и расчеты, рабочее проектирование, проведение инженерных проверочных расчетов и т.д. Такая работа обычно выполняется несколькими конструкторскими отделами. Применение современных систем автоматизированного проектирования (САПР) позволило существенно снизить трудоемкость таких работ, сократить время некоторых этапов проектирования (CAD) и подготовки к производству (CAM). Дальнейшие тенденции развития цифрового проектирования направлены в сторону полной автоматизации расчетов, создания трехмерных моделей, сокращения временных затрат и исключения ошибок. В данном разделе рассмотрены современные методы инжиниринга, возможные для применения при проектировании прокатного оборудования.

#### 1.1.1 Метод параметрического моделирования

Одним из современных методов инжиниринга металлургического оборудования является метод параметрического моделирования. Параметрическим моделированием называют моделирование с задействованием параметров некоторых элементов имеющейся модели и определённых отношений между этими параметрами. Так, использование параметризации позволяет оперативно рассмотреть большое количество различных конструктивных схем и благодаря этому избежать принципиальных ошибок в проектировании.

В сущности, параметрическое моделирование представляет собой не столько отдельный метод проектирования (как, например, метод топологической оптимизации), сколько совокупность нескольких подходов к созданию компьютерных моделей.

Среди таких подходов можно выделить подход введения некоторых ассоциативных связей между отдельными деталями или частями объекта, выраженных в прямых зависимостях или формулах. Так, при параметрическом моделировании, конструктор создаёт и использует математическую модель описываемых объектов, которая включает в себя связи между объектами и различные параметры (отношения, углы, пропорции),

которые можно регулировать. При регулировке данных параметров происходит изменение всей конфигурации детали, а также взаимное перемещение деталей и узлов в сборке.

Также можно выделить подход создания строгой иерархии объектов (деталь-сборка-модель), где в случае внесения изменений в объект нижнего уровня иерархии, они наследуются во все объекты более высокого уровня иерархии, где данный объект задействован. Благодаря такому подходу значительно снижаются затраты на компьютерное моделирование, так как не требуется дублировать сделанные в детали изменения во все сборки и модели, где данная деталь используется.

Также следует упомянуть возможность использования WAVE-технологии, которая по своей сути является сочетанием двух предыдущих подходов. Технология WAVE (What if Alternative Value Engineering) предназначена для целевого управления глобальными модификациями, проводимыми в больших сборках сложных изделий. Она позволяет создавать любые ассоциативные структуры, осуществлять анализ ассоциативных связей и управлять их статусом, проводить оптимизации на концептуальной упрощённой электронной модели изделия и проводить управляемую трансляцию изменений в результате оптимизации на детальную электронную модель сколь угодно сложного изделия.

Сама концепция параметрического моделирования появилась ещё на заре развития современных САПР систем. Однако, она очень долгое время не могла быть ни в каком виде эффективно реализована из-за слишком низких вычислительных мощностей компьютеров тех лет, а также недостаточного уровня развития инструментов проектирования [1].

Самые первые широко известные САПР системы, обладающие возможностью параметризации, были выпущены в конце 80-х годов в США. Так, первая подобная САПР система Pro/Engineer обладала возможностями трёхмерного твердотельного параметрического моделирования и была выпущена Массачусетской корпорацией PTC (Parametric Technology Corporation) в 1987 году.

В современных CAD-системах среднего и тяжёлого класса упор сделан на трёхмерную параметризацию. Двухмерная параметризация хоть и присутствует в системах такого класса, но как правило почти не используется. В целях использования исключительно двухмерной параметризации обычно используются системы лёгкого класса, которые, в своей сути, представляют собой усечённые версии более продвинутых систем [2].

Трёхмерное параметрическое моделирование является более комплексным и сложно настраиваемым инструментом. Разработчики САПР систем среднего и тяжелого классов воспринимают такую параметризацию как одну из важнейших составляющих их системы,

которая позволяет успешно продавать свой продукт и быть конкурентоспособными на рынке.

В параметрическом моделировании существует четыре основных типа параметризации:

- табличная параметризация;
- иерархическая параметризация;
- вариационная (размерная) параметризация;
- геометрическая параметризация.

Табличная параметризация позволяет пользователю создать и описать основные параметры изготавливаемой детали. Таким образом, создание каждого следующего экземпляра детали осуществляется с помощью задания по таблице основных параметров создаваемого экземпляра. Такая параметризация имеет весьма скромные возможности, так как обычно отсутствует возможность задания новых произвольных значений параметров и привязки к ним геометрических отношений между частями объекта. Однако, такой вид параметризации всё равно очень широко применяется, поскольку позволяет создавать библиотеку простых типовых деталей значительно быстрее и проще.

Иерархическая параметризация задействует в своей основе иерархическую историю построений. Так, в ходе построения модели все шаги логируются (записываются) в историю, которая отображается в отдельном окне. В нём перечислены все сделанные операции, созданные элементы, сделанные эскизы в порядке их создания. Эта история запоминает не только порядок появления тех или иных элементов, но и их иерархическое отношение друг с другом. Благодаря этой иерархии модель можно откатить назад к тому или иному этапу без каких-либо проблем. Как правило, такая параметризация имеется во всех САПР системах, которые работают с трёхмерными моделями (например, SolidWorks). Очень часто такой вид параметризации сочетается с вариационной или геометрической параметризацией, о которых будет сказано далее.

Вариационная параметризация позволяет пользователям строить модели, задавая отношения между объектами этих моделей, выраженные в виде равенств или систем уравнений. Приблизительный процесс создания такой параметрической модели выглядит следующим образом:

- создаётся эскиз для будущего создания трёхмерного элемента с заданием отношений (параметрических связей) между элементами этого эскиза;
- задаются известные параметры создаваемого трёхмерного тела. Система, в свою очередь, по известным параметрам определяет неизвестные параметры, которые ранее были описаны в виде уравнений или равенств;

— осуществляется создание трёхмерного тела по заданному эскизу. Известные атрибуты данного трёхмерного тела также рассчитываются по ранее заданным отношениям и формулам.

В случае необходимости включения созданного трёхмерного тела в имеющуюся сборку или модель, взаимное положение элементов данной сборки может быть также выражено в виде указания их сопряжений. Такая параметризация позволяет быстро перестроить сборку в пределах необходимых ограничений и легко адаптировать эскизы имеющихся деталей к новым требованиям и ограничениям.

Геометрической параметризацией принято считать такое параметрическое моделирование, которое позволяет пользователю изменять геометрию каждого имеющего тела в зависимости от параметров других тел, находящихся с ним в сопряжении. Таким образом, элементы параметрической модели геометрической параметризации можно разделить на элементы построения и элементы изображения. Элементы построения выполняют функцию задания параметрических связей между частями сборки/детали. Они могут содержать в себе формулы, переменные и отношения. Иными словами, всё то, что характеризует требуемую архитектуру сборки/детали в конструкторском понимании. Элементы изображения представляют собой построенные по заданным параметрическим параметрам конструкторские линии, которые очерчивают сборку/деталь. При изменении одного из элементов построения, все зависящие от него элементы изображения перестраиваются в соответствии с новыми вводными. Приблизительный процесс создания такой параметрической модели выглядит следующим образом:

- создание первичной геометрии профиля с перечислением элементов построения и отношений между параметрами;
- указание известных зависимостей и имеющихся значений переменных;
- пересчёт элементов изображения модели в соответствии со всеми заданными параметрами.

Дальнейшие этапы аналогичны этапам в процессе моделирования с помощью метода вариационной параметризации. Геометрическая параметризация позволяет быстро и адаптивно изменять геометрию моделей.

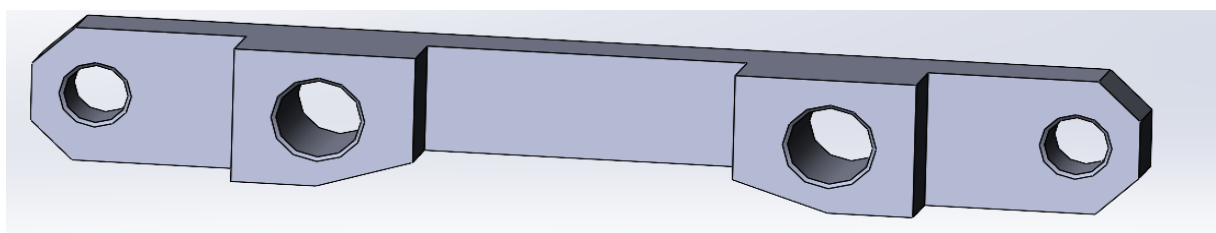
#### 1.1.2 Метод топологической оптимизации

Топологическая оптимизация является одним из современных методов инжиниринга. Она представляет собой поиск оптимальной формы создаваемой детали с учётом заданных сопряжений, креплений и целевых нагрузок, которые будут на неё воздействовать в процессе эксплуатации [3]. Как правило, оптимальной будет являться та форма, которая

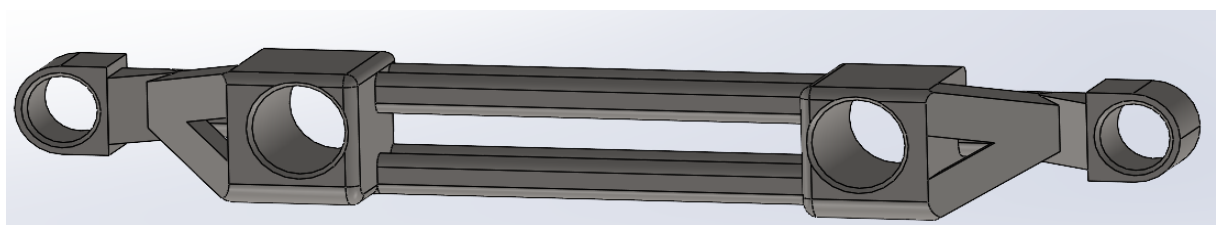
при заданных нагрузках сохранит требуемый коэффициент запаса прочности и будет обладать меньшей массой [4].

Обычно при использовании метода топологической оптимизации конструктор изначально задействует имеющуюся трёхмерную модель сплошного тела, которая уже выдерживает целевые нагрузки. Он указывает на модели нагрузки, которые будут на неё воздействовать, а также указывает зоны сопряжения и крепления, которые при работе оптимизирующего алгоритма изменять не следует. Далее он задаёт процент требуемого снижения массы детали и нужный коэффициент запаса прочности.

Компьютерная оптимизация топологии даёт довольно неконвенциональные варианты геометрии. Она является отличным инструментом для снижения веса разрабатываемой детали/узла без ухудшения его прочностных характеристик. Так как топологическая оптимизация позволяет оптимизировать расход материала, то, соответственно, она снижает стоимость изготовления построенной модели. Примеры топологической оптимизации изделий показаны на рисунках 1.1–1.2.



(a)



(б)

Рисунок 1.1 – Пример топологической оптимизации рычага стана продольной прокатки ДУО-250: (а) исходная модель рычага; (б) модель рычага после топологической оптимизации.

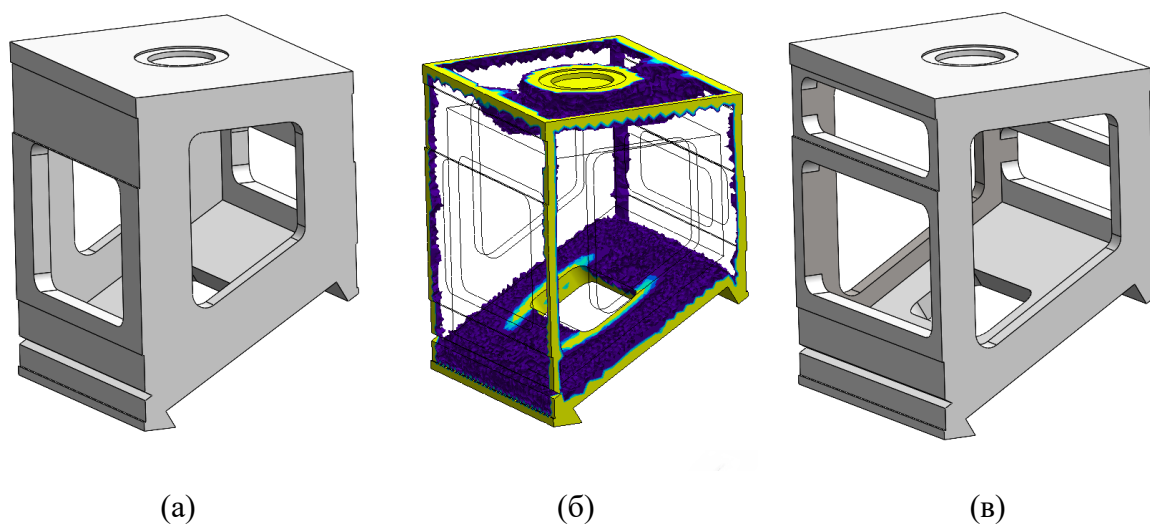


Рисунок 1.2 – Пример оригинального изделия и изделия, сформированного с помощью метода топологической оптимизации: (а) исходная модель; (б) модель с удаленными участками материала; (в) оптимизированная модель.

Уже сейчас можно сделать вполне обоснованный прогноз, что производство без лучших технологий цифрового моделирования и 3D-печати будет менее конкурентоспособно по сравнению с производствами, которые внедрили эти технологии в свои бизнес-процессы. В таких обстоятельствах применение топологической оптимизации становится не столько конкурентным преимуществом, сколько одним из условий для выживания компаний [5].

Также стоит отметить, что топологическая оптимизация даёт наилучший по заданным условиям вариант геометрии. Такой вариант всегда интересен и полезен инженеру для ориентации – даже в отсутствии возможностей его реализации. Несмотря на то, что идеальной формы модели в таком случае достигнуть невозможно - возможно к ней максимально приблизиться, создавая модели под более традиционные технологии изготовления.

Во время топологической оптимизации форма изделия формируется с помощью оптимизирующего алгоритма, что позволяет добиться необычных результатов, весьма далёких от классического дизайна. Данная технология является особенно полезной при проектировании лёгких конструкций.

Одной из наиболее популярных систем компьютерного проектирования и моделирования имеющей возможности оптимизировать топологию сплошного тела является SolidWorks с модулем SolidWorks Simulation. Топологическая оптимизация впервые появилась в этом модуле в 2018 году [6]. Процесс разработки какой-либо детали с помощью топологической оптимизации включает в себя 6 основных этапов.

- Создание исходной модели.
- Статическое исследование исходной модели.
- Исследование топологии.
- Восстановление геометрии.
- Статическое исследование восстановленной геометрии.
- Подготовка к производству.

Создание детали. Перед тем, как начать оптимизировать топологию детали, следует эту самую деталь спроектировать. Первичное проектирование в таком случае ничем не будет отличаться от обычного проектирования в CAD-системе. Деталь проектируется из предполагаемого материала, с заданием нужных отверстий, через которые она будет стыковаться с другими смежными элементами. Происходит присвоение статических и динамических нагрузок, которым будет подвергнута данная деталь. Помимо стандартных нагрузок, можно задавать сохранённые области – области геометрии, которые необходимо сохранить в любом случае. Они задаются через грани с сохранением глубины по нормали.

Статическое исследование детали. Перед выполнением исследования топологии следует выполнить статическое исследование детали на заданные статические и динамические нагрузки. Важно отметить, что если исходная деталь не выдерживает целевой нагрузки, то после выполнения исследования топологии и удаления материала она тем более не будет выдерживать целевой нагрузки, так как коэффициент запаса прочности снизится. Необходимо, чтобы деталь успешно выдерживала целевые нагрузки и имела высокий коэффициент запаса прочности, который для валковых узлов обычно принимается равным 5, а для станины – 10 [7, 8]. С помощью исследования топологии можно будет удалить наименее влияющий на коэффициент запаса материал, значительно уменьшив массу детали, при этом сохранив приемлемый коэффициент запаса прочности (~3). В результате статического исследования будет получена исходная модель детали с распределением коэффициента запаса прочности по поверхности изделия.

Исследование топологии. Перед началом исследования топологии детали следует задать цели такого исследования. В SolidWorks пользователю предложено несколько целей. В качестве целей исследования можно выбрать одну из них, несколько или все сразу.

Далее эти цели будут рассмотрены чуть подробнее:

- достижение наилучшего отношения жёсткости к массе. Например, уменьшить массу на какой-либо процент, сохранив при этом коэффициент запаса прочности в желаемых интервалах;

— минимизирование смещения при ограничении массы. Например, убрать какой-либо процент массы  $X$  так, чтобы коэффициент смещения увеличился как можно меньше;

— минимизирование массы при ограничении смещения. Например, убрать как можно больше массы так, чтобы коэффициент смещения увеличился на множитель не более чем  $X$ .

Также, перед началом исследования, следует закрепить области, которые необходимо иметь на финальной модели (места крепления, конструктивно важные грани). Дело в том, что такие области могут иметь высокий коэффициент запаса прочности. Если оставить такие области не закреплёнными, то система может их убрать или геометрически деформировать, сделав непригодными к целевой эксплуатации.

После закрепления всех областей можно запускать исследование топологии. Как правило оно занимает больше времени, чем статическое исследование. Исследование представляет графическую модель исходной заготовки, без материала наименее влияющего на коэффициент запаса прочности при целевых нагрузках. Она служит ориентиром для инженера, показывая места заготовки, где возможно убрать массу.

Восстановление геометрии. На этапе восстановления геометрии инженер интерпретирует полученную математическую поверхность и создаёт приближённое к ней твёрдое тело, протягивая профиль по траекториям, максимально совпадающим с полученной поверхностью. Всё это выполняется с учётом технологических возможностей доступного оборудования или иных соображений. Так, если не учитывать технологические возможности производственного оборудования, то можно спроектировать деталь, которую трудно/невозможно изготовить, например, из-за слишком узких отверстий или чрезмерного количества технологических операций на изготовление. Так или иначе, при восстановлении геометрии инженер отклоняется от формы референсного распределения массы, полученного в результате исходного моделирования. Поэтому необходимо оценить допустимость таких отклонений, запустив валидацию модели.

Статическое исследование восстановленной геометрии. По сути, это ещё один статический анализ, в котором восстановленная геометрическая модель подвергается таким же целевым нагрузкам, каким подвергалась исходная модель. В результате валидации будет получено распределение коэффициента запаса прочности по всей поверхности геометрической модели. Случай, когда коэффициент запаса прочности высок, свидетельствует о том, что полученную конструкцию можно ещё облегчить. Процесс топологической оптимизации является итеративным, поэтому исходная заготовка может проходить все рассмотренные этапы оптимизации несколько раз, пока инженер не

достигнет желаемого результата или же модель достигнет состояния, когда дальнейшее уменьшение массы неизбежно приведёт к критическим деформациям из-за заданных нагрузок.

Подготовка к производству. После достижения оптимальной формы начинается заключительный этап подготовки к производству. Собирается финальная сборка, производится проверка на доступность монтажных отверстий, проверка на возможность стыковки сопряжённых элементов. После подготовки к производству и изготовления опытного образца, спроектированную деталь можно отправлять на серийное производство.

В рамках разрабатываемого алгоритма метод топологической оптимизации может быть использован на финальных этапах. После финальной валидации построенной по разрабатываемому алгоритму модели и проведения её проверочных расчётов, в случаях, когда коэффициент запаса прочности отдельно взятой детали или узла избыточно высок, имеет смысл провести топологическую оптимизацию для уменьшения веса выбранной детали или узла, с сохранением прочностных характеристик. Так, например, для рабочей клетки топологическую оптимизацию можно применить к наиболее сложным по форме деталям или имеющим максимальный вес, например, станине или кассете.

В случае использования топологического исследования геометрии, после изменения деталей следует еще раз выполнить последние шаги алгоритма по расчету на прочность и устойчивости модели.

## 1.2 Анализ конструктивных особенностей трёхвалковых клеток винтовой прокатки

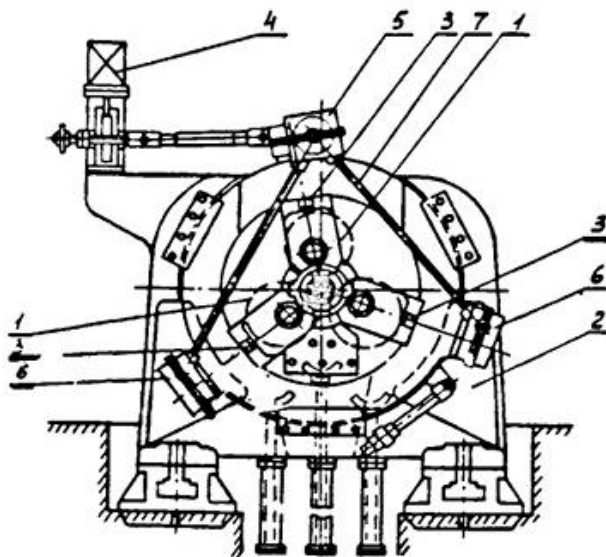
### 1.2.1 Краткая история трёхвалковых клеток винтовой прокатки

Широко известный факт, что один из самых популярных способов изготовления гладких бесшовных труб – это их изготовление способом винтовой прокатки со схемой двухвалковой прошивки, разработанный братьями Маннесманн в 1886 году. Очень длительное время данный способ производства был доминирующим.

Самые ранние попытки реализовать прокатку на трёхвалковом стане можно отнести к концу 19 века. Американская компания Бдисс предпринимала попытки реализовать прошивку на трёхвалковом стане собственного производства уже в начале 20 века, однако они тоже не увенчались успехом. В начале 30-х годов 20 века в США процесс прошивки на трёхвалковом прошивном стане был подробно исследован и описан [9].

На рисунке 1.3 представлена опытная схема конструкции трёхвалкового прошивного стана, разработанного в Германии. Конструкция представляет собой кольцевую станину, внутри которой смонтированы три кассеты с валками. На схеме видно, что привод

нажимных винтов выполнен групповым с трансмиссионными промежуточными валами. Это обеспечивает одновременное сведение-разведение калибра к оси прокатки при синхронном перемещении всех винтов, однако существенно усложняет конструкцию клетки.



1 – три рабочих валка; 2 – круглый корпус; 3 – нажимные винты; 4 – электродвигатель; 5 – редуктор; 6 – редуктор; 7 – промежуточные валы.

Рисунок 1.3 – Конструкция разработанного в ФРГ трёхвалкового прошивного стана.

На рисунке 1.4 представлена конструкция трёхвалкового прошивного стана, разработанного в 20 веке в США. Станина клетки является незамкнутой и имеет разъемную крышку, в которой смонтирован один из трех валков с кассетой. Два других валка монтируются в нижней части станины – основании. В данной конструкции все валки устанавливаются со смещением относительно вертикальной оси. Кроме того, в представленной конструкции можно видеть, что в клетке имеется только два привода нажимных устройств. Из этого следует, что в данном случае используется схема настройки калибра путем сведения двух валков к центру стационарного третьего валка. Такая схема подразумевает плавающую (изменяющуюся) ось прокатки, что требует перенастройки проводок и входной и выходной стороны при переходе на другой диаметр заготовки.

Разъемная станина упрощает перевалку валков, однако при этом снижает общую жесткость и прочность за счет дополнительных соединительных элементов.

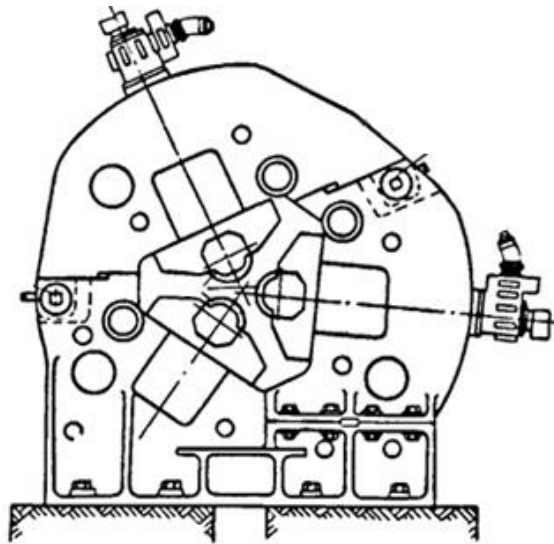
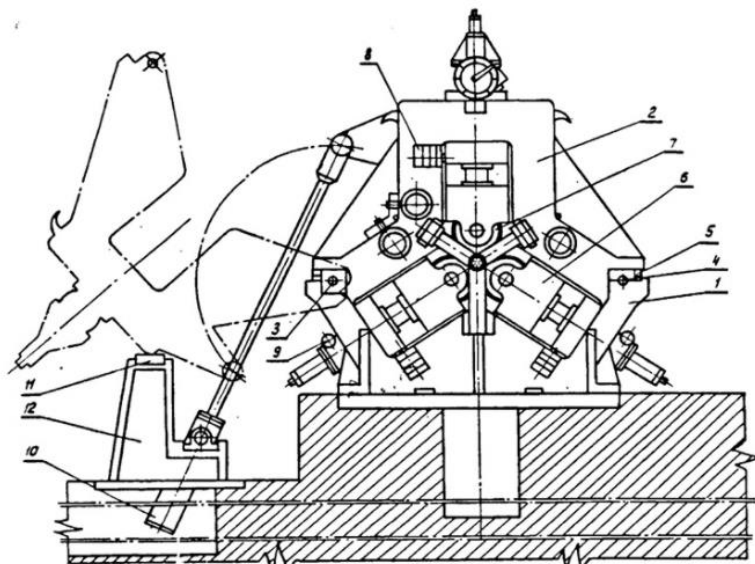


Рисунок 1.4 – Разработанная в 20 веке в США конструкция трёхвалкового прошивного стана.

На рисунке 1.5 представлена конструкция трёхвалкового стана, разработанного в 20 веке в СССР. Клеть имеет массивную разъемную станину, состоящую из литого основания и откидывающейся крышки, для открытия которой предусмотрен гидроцилиндр с длинным штоком и опорная рама. В данной конструкции предусмотрена схема радиальной настройки валков с индивидуальными приводами нажимных винтов, а также барабаны для изменения угла подари рабочих валков.



1 – закреплённая станина; 2 – крышка; 3 – ось, соединяющая станину и крышку; 4 – ещё одна ось, соединяющая станину и крышку; 5 – клинья, соединяющие станину и крышку; 6 – барабаны.

Рисунок 1.5 – Разработанная в 20 веке в СССР конструкция трёхвалкового стана.

В СССР институтом ВНИИМЕТМАШ (Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения) был спроектирован ряд трёхвалковых станов типоразмеров для прокатки периодических профилей. Часть этих станов предназначались для промышленного назначения, а часть были спроектированы в исследовательских и экспериментальных целях.

В конце 50-х годов прошлого века на Днепровском металлургическом комбинате им. Ф.Э. Дзержинского на Украине трёхвалковый стан винтовой прокатки эксплуатировался для изготовления круглых периодических профилей. Он использовал заготовки диаметром 240 мм и длиной до ~2,5 м для изготовления круглых периодических вал-осей с диаметром 40–120 мм и длиной до 4 метров.

Примерно в это время трёхвалковые станы начали появляться на многих советских машиностроительных заводах. Первыми среди них были – Челябинский электромашиностроительный завод и Минский тракторный завод. Чуть позже они появились на Московском заводе малотиражных машин и Конотопском заводе «Красный металлист».

Известны двухвалковые и трёхвалковые опытно-промышленные и промышленные станы оригинальной конструкции, спроектированные Электростальским заводом тяжёлого машиностроения (АО «ЭЗТМ») при технологической и конструкторской поддержке учёных МИСИС [10-12]. Инициаторами и основными руководителями комплексных разработок процесса и конструкций станов РСП были И.Н. Потапов и П.И. Полухин. В короткие сроки специалистами был реализован ряд новаторских разработок конструкций всех основных узлов и механизмов станов винтовой прокатки. Данные станы позволяли прокатывать заготовки промышленных типоразмеров диаметром до 500 мм. В том числе при участии учёных МИСИС в АО «ЭЗТМ» был разработан комплекс СВП-500 для производства заготовок из циркониевого сплава и СВП-200 для урановых сплавов Чепецкого механического завода (АО «ЧМЗ»), двухклетевой стан СРВП-130 ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» для прокатки титановых сплавов, а также обжимная клеть РСП для прокатки сталей и сплавов в составе стана 350/250 АО «Металлургический завод «Электросталь» [13-15]. Обжимные станы РСП конструкции АО «ЭЗТМ» в свою очередь были установлены в составе трубопрокатных агрегатов ТПА-80 (АО «СинТЗ») и ТПА-200 (Artrom Steel Tubes S.A.) для предварительного обжатия непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) [16-18].

К концу 20 века в Советском Союзе в эксплуатации насчитывались десятки трёхвалковых станов винтовой прокатки. Приблизительно в это же время такие станы активно внедрялись и за рубежом. Так, в США в 1962 году был спроектирован и

сконструирован трёхвалковый стан. На рисунке 1.6 представлена рабочая клетка этого трёхвалкового стана.

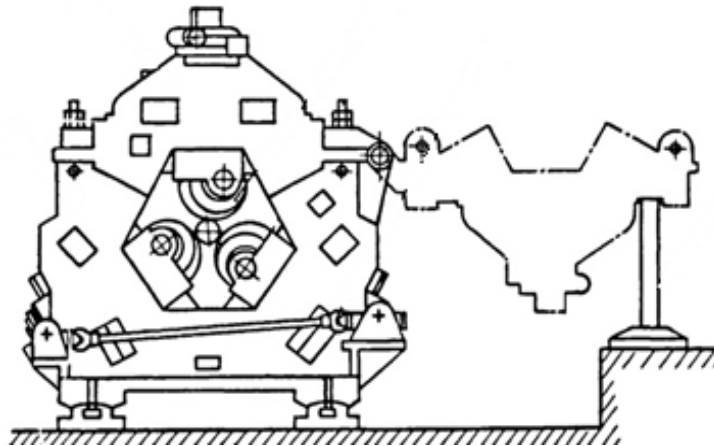
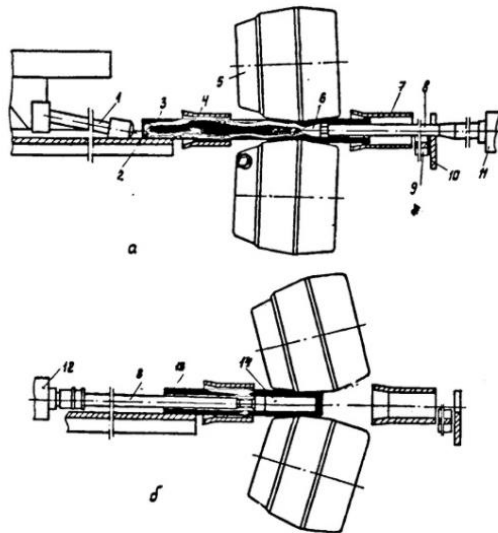


Рисунок 1.6 – Разработанная в США рабочая клетка трёхвалкового прошивного стана с откидной крышкой.

Компания «Mannesman Meer» совместно с компанией «Stahl- und Röhrenwerk» из Дюссельдорфа разработала и сконструировала трёхвалковый прошивной стан для прокатки толстостенных труб с жёсткими допусками. С учётом нескольких изменений трёхвалковый стан может быть использован для раскатки на цилиндрической оправке или для прошивки на короткой конической оправке. Схемы данных процессов представлены на рисунке 1.7.



1 – заталкиватель; 2 – вводный желоб; 3 – заготовка; 4 – вводная проводка; 5 – валок; 6 – оправка; 7 – выводная проводка; 8 – стержень; 9 – выводной желоб; 10 – сбрасыватель гильз; 11 – упорный механизм; 12 – удерживающая головка; 13 – гильза; 14 – цилиндрическая оправка

Рисунок 1.7 – Схемы процесса прошивки (А) и процесса раскатки (Б) на трёхвалковом стане, сделанном в Германии.

Также среди зарубежных станов известен планетарный стан винтовой прокатки «PSW Rolling», разработанный в 70-е годы прошлого века и имеющий оригинальную конструкцию, где заготовка совершает только поступательное движение, а клеть вместе с валками вращается вокруг прокатываемой заготовки [19-24]. Отличительной особенностью данного стана также является большие углы раскатки  $\delta$ , принимающие значения 40-70°.

В Великобритании находятся в промышленной эксплуатации несколько трубопрокатных установок, использующих в своём составе трёхвалковые прошивные и раскатные станы. Помимо этого, существует информация о введении в промышленное использование трёхвалкового прошивного стана в Испании, Италии и Чехии.

Во Всесоюзном институте лёгких сплавов (ВИЛС) трубы из титановых и алюминиевых сплавов изготавливали с помощью методов прессования и последующей прокатки на станах ХПТ (холодная прокатка труб). Такие изделия были особенно востребованы в авиационной промышленности. Однако, производство труб по этому технологическому процессу весьма неэкономично из-за крайне низкой производительности [25]. В качестве компромисса был разработан новый технологический процесс, который не подразумевал сверления отверстия в заготовке и заменял прессование на прошивку на стане винтовой прокатки. В дальнейшем полученная гильза должна быть раскатана и обработана на стане.

Исследования в области использования данного компромиссного способа послужили стимулом для перехода различных заводов к похожим схемам агрегатов винтовой прокатки. Так, КУМЗ (Каменск-Уральский металлургический завод) использует трёхвалковую раскатную клеть совместно с двухвалковой прошивной клетью. А ВСМПО (Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение – город Верхняя Салда, Свердловская область) использует трёхвалковую раскатную клеть и трёхвалковую прошивную клеть. В конце 70-х годов подобные станы активно изготавливались и поставлялись в европейские страны – Италию, Болгарию, Чехословакию, Англию.

На заводе «Станконормаль» в Москве был установлен двухвалковый стан для прокатки заготовок цилиндрических штифтов. На многих машиностроительных заводах были установлены станы винтовой прокатки для изготовления ребристых труб. Среди этих заводов можно назвать Троицкий электромеханический завод, Запорожский трансформаторный завод и завод «Электросила» в городе Санкт-Петербург.

Известны также оригинальные конструкции трёхвалковой клетки стана винтовой прокатки, предназначенной для прокатки тугоплавких металлов в вакууме [26-31]. Основными отличительными особенностями данных клеток является консольное расположение валков и большие углы раскатки 45-60°.

Помимо вышеописанных крупных станов винтовой прокатки в МИСИС были разработаны также трёхвалковые министаны винтовой прокатки [32, 33]. Министаны представляют собой технико-технологическую систему радиально-сдвиговой деформации заготовок сплошного сечения из сплавов более 300 марок [34]. Министаны, благодаря своему высокому инновационному потенциалу, смогли снискать достаточно высокую популярность в промышленном применении: с 1992 года в промышленную эксплуатацию в различных странах мира (особенно в СНГ) было введено более 14 станов типоразмера 10–30, 10 станов типоразмера 14–40 и 10 станов типоразмера 20–45 [35]. Министаны РСП конструкции МИСИС работают в настоящее время на таких крупных предприятиях, как ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (г. Верхняя Салда), АО «ЧМЗ» (г. Глазов), АО «Русполимет» (г. Кулебаки) и др.

В таких станах оптимальные технологические параметры радиально-сдвиговой деформации прутков интегрированы в конструкцию стана на этапе концептуального проектирования. Соосное расположение мотор-редукторов главного привода и наклонных рабочих валков минимизирует динамические нагрузки, шум и вибрацию при прокатке. Главный привод и рабочая клеть монтируются на общей сварной раме. Установка стана не требует силового фундамента. При необходимости станы легко перемещаются на новое место. Эксплуатация станов возможна персоналом с минимальной квалификацией без инженерного сопровождения. В очаге деформации доминируют макросдвиговые перемещения частиц металла, глубоко прорабатывающие структуру на всех уровнях металлофизического строения.

Пластические характеристики и многие служебные возрастают в 1,5...2,0 и более раз по сравнению с традиционными способами обработки давлением.

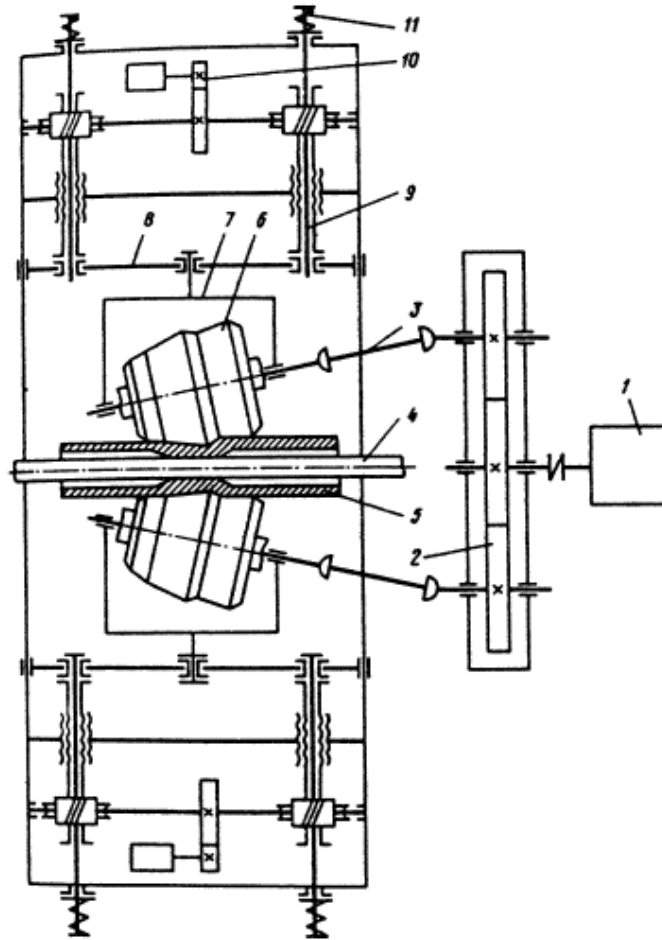
Термин «радиально-сдвиговая прокатка» обозначает радиальную деформацию (обжатие) заготовки по схеме круг-круг с объемным макросдвигом, наведенным замедлением движения внешнего слоя и ускорением внутреннего в условиях геликоидального истечения металла в очаге деформации [36]. РСП предназначена для деформации сплошных заготовок с повышением их механических и структурных свойств [11]. Данный вид винтовой прокатки был разработан и подробно описан учёными из МИСИС под руководством И.Н. Потапова и П.И. Полухина в 70-ые годы прошлого века, когда было установлено влияние траектории движения прокатываемой заготовки на условие деформации металла. Современное состояние научных, технологических основ и принципов конструирования оборудования станов РСП хронологически складывается из диссертационных работ В.П. Романенко, Е.А. Харитоновой, В.Я. Зимина, С.П. Галкина. РСП может использоваться для повышения механических свойств мелкозернистых магниевых

сплавов [37], алюмоматричных композиционных сплавов эвтектического типа [38], а также получения прутков алюминиевых [39-42], хромосодержащих [43], титановых [44-47] и жаропрочных [48] сплавов. Также РСП применяется в исследования для интенсивного измельчения структуры стали и самого разного вида сплавов [49-55].

Таким образом, история проектирования трехвалковых станов винтовой прокатки начинается с прошивных станов. С точки зрения конструкции клетей можно выделить несколько направлений. ВНИИМЕТМАШ разработал в основном конструкции клетей для прокатки коротких периодических профилей, шаров, втулок и других деталей машиностроения. При этом клетки отличались небольшим углом подачи. ЭЗТМ спроектировал трехвалковые станы винтовой прокатки для раскатки труб, а также крупноразмерные клетки для обжатия заготовок и прутков. Данные станы как правило имеют разъемные клетки с барабанами для установки угла подачи рабочих валков в широком диапазоне. Третьим направлением является разработка компактных клетей министанов РСП в МИСИС, предназначенными для прокатки прутков круглого сечения. Основные конструктивные особенности рассмотрены далее в следующем пункте.

### 1.2.2 Особенности конструкции трёхвалковых клетей винтовой прокатки

Рассмотрим типовую конструкцию трёхвалковых раскатных станов винтовой прокатки. Главная линия трёхвалкового раскатного стана может располагаться как со стороны выхода трубы, так и со стороны входа. Она, как правило, включает в себя рабочую клеть с гребневыми валками и привод, который может быть как групповой, так и индивидуальный. Схема трёхвалкового раскатного стана представлена на рисунке 1.8. Угол раскатки как правило не превышает  $7^\circ$ . Это позволяет добиться более удобного расположения шпиндельных соединений. Чтобы осуществить перенастройку стана на прокатку труб меньшего или большего диаметра требуется переместить барабаны в радиальном направлении [56].



1 – двигатель главного привода; 2 – шестеренная клеть; 3 – шпindelь; 4 – оправка; 5 – гильза; 6 – рабочий валок; 7 – кассета рабочего валка; 8 – промежуточный вал; 9 – нажимное устройство; 10 – привод механизма сведения и разведения валков; 11 – пружина

Рисунок 1.8 – Схема трёхвалкового раскатного стана.

Особенность трёхвалковых раскатных станов состоит в том, что тут отсутствует технологический инструмент для сдерживания тангенциальной раскатки. Из-за этого толстостенные гильзы, получаемые в этих трёхвалковых раскатных станах, имеют практически предельное отклонения диаметра к толщине стенки равное 10–11. Если  $D/S$  превышает 11, то на концевых частях трубы начнут неизбежно возникать гранённые растробы, которые сделают процесс прокатки куда более сложным [57].

Основное отличие клетей трёхвалковых раскатных станов между собой состоит в способе регулировании угла подачи и способе установки валков. Так, в более старых станах угол подачи меняют с помощью замены подушек валков. В таком случае, каждому имеющемуся комплекту подушек соответствует один конкретный угол подачи. В более современных станах предусмотрена возможность плавного регулирования угла подачи

[58]. В современных министанах винтовой прокатки для повышения жесткости и снижения общей массы клетки угол подачи обычно нерегулируемый и задан конструктивно.

Современная трёхвалковая клетка раскатного стана представлена на рисунке 1.9. Станина этого стана состоит из двух частей. При необходимости выполнить перевалку, крышка стана с одним барабаном может откидываться. Движение барабанов и валков реализовано с помощью нажимных винтов. Для прижима барабанов к нажимным винтам используются подпружиненные уравновешенные тяги, проходящие через сквозные отверстия в центре винтов.

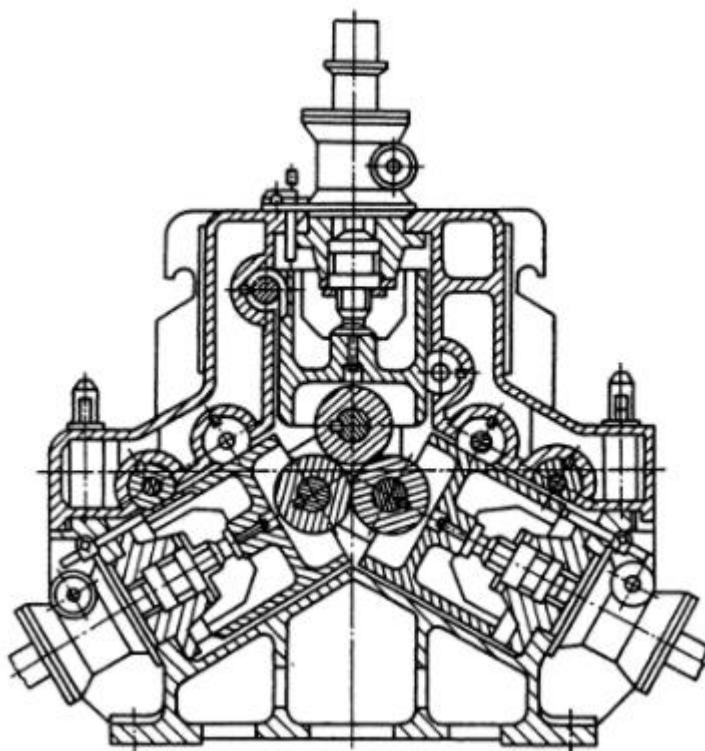
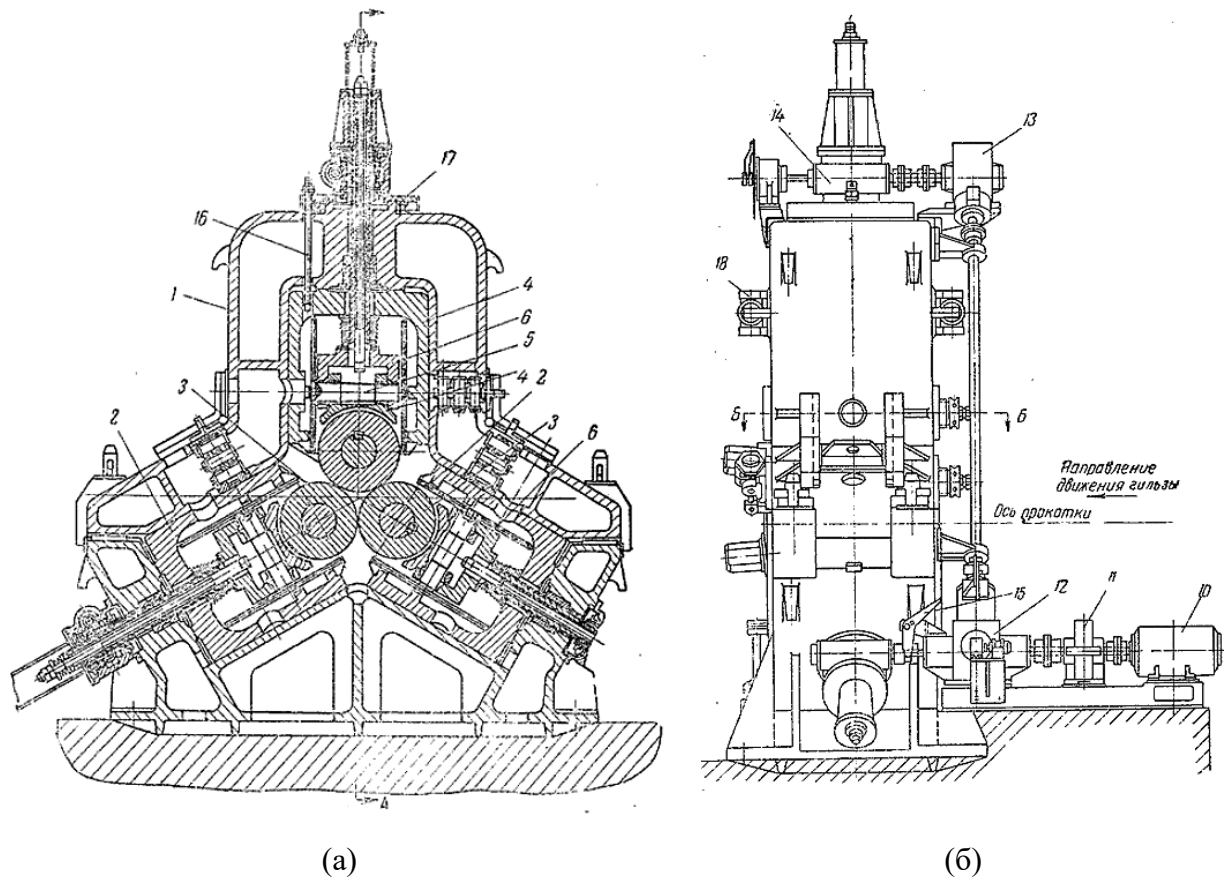


Рисунок 1.9 – Трёхвалковая клетка раскатного стана с механизмом уравнивания верхнего барабана и механизмом перемещения валков.

Устройство привода нажимных винтов может быть как индивидуальным, так и групповым. Оно включает расцепные муфты, синхронизирующие валы и конические и распределительные редукторы. К его слабым сторонам можно отнести скорость работы. В случае же использования индивидуального привода все вышеперечисленные недостатки сходят на нет. Однако, такие приводы сложнее синхронизировать.

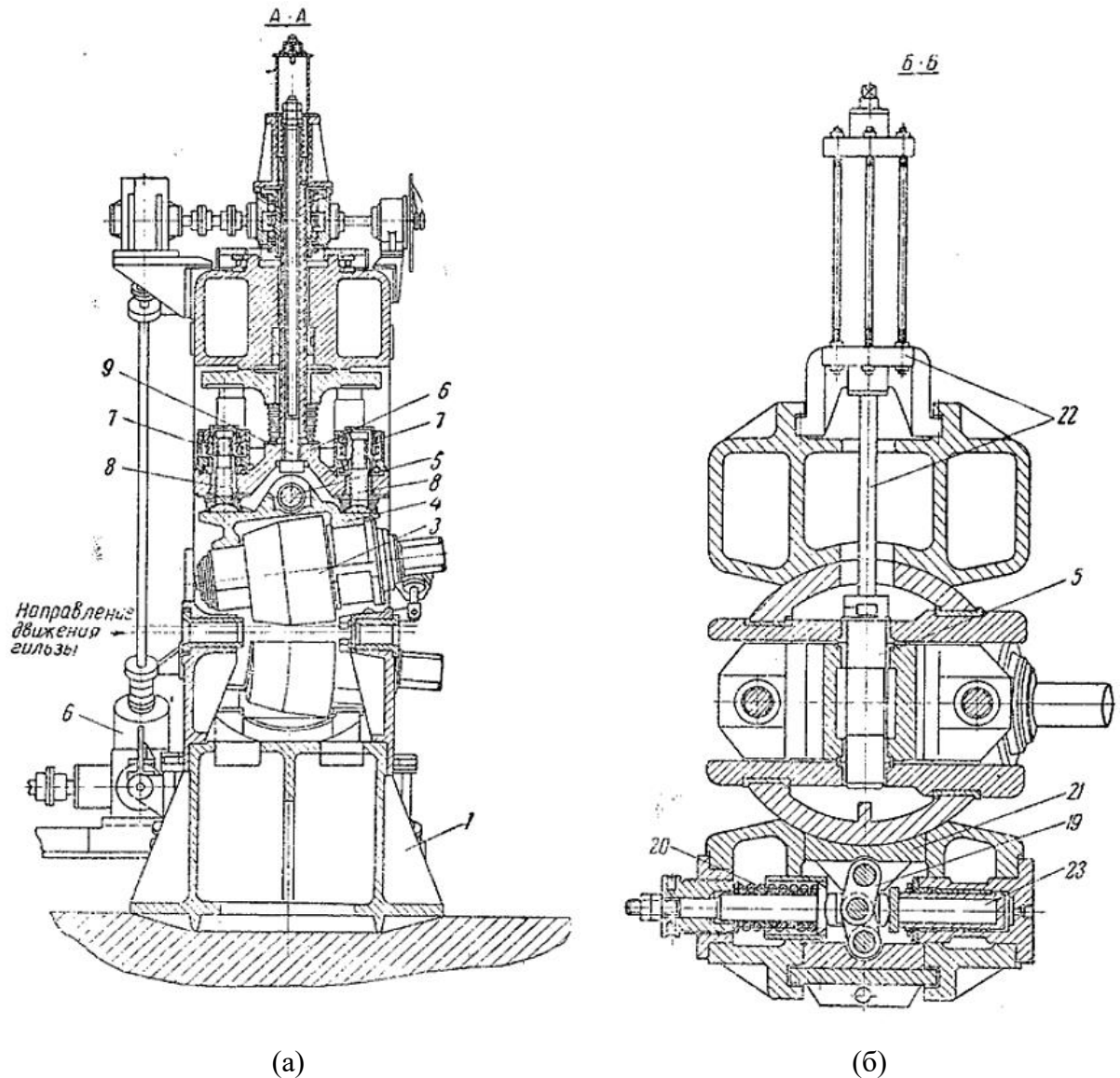
Как правило, современные конструкции выходных сторон трёхвалковых раскатных станом максимально используют конструктивные элементы выходных сторон прошивных станом с осевой выдачей гильз [59].

Разберём конструкцию некоторых советских и российских трёхвалковых станов винтовой прокатки. Так, особенностью конструкции советской трёхвалковой клетки трубопрокатного стана винтовой прокатки 1965 года является один центральный нажимной винт, который приводится в движение общим для всех нажимных устройств валков приводом [60]. Такое изменение позволило немного упростить настройку и конструкцию данной клетки. Данная клетка представлена на рисунках 1.10–1.11.



1 – станина; 2 – барабаны; 3 – валки; 4 – кассета; 5 – закрепляющая ось; 6 – подвижная траверса; 10 – электродвигатель; 11 – редуктор; 12 – распределительный редуктор; 13 – три конические пары; 14 – червячный глобоидный редуктор; 15 – муфты переключения; 16 – тяги; 17 – обойма; 18 – механизм для изменения угла подачи рабочих валков.

Рисунок 1.10 – Рабочая клетка трубопрокатного стана винтовой прокатки 1965 года: (а) – вид спереди; (б) – вид сбоку.

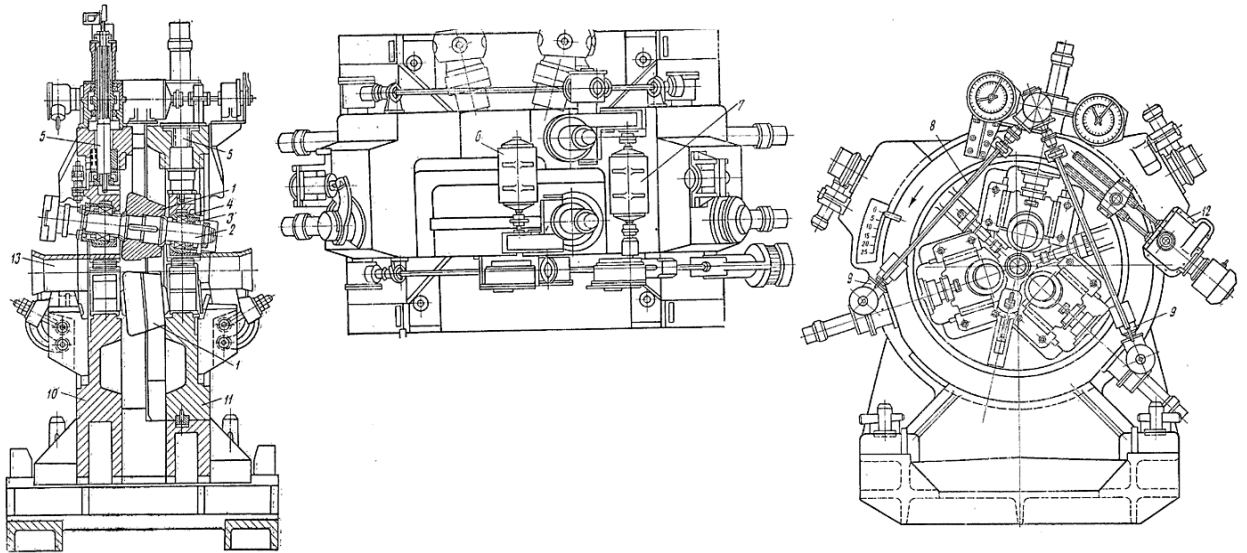


1 – станина; 3 – валок; 4 – кассета; 5 – закрепляющая ось; 6 – подвижная траверса; 7 – редуктор; 8 – нажимной винт; 9 – тяга; 19 – механизмы стопорения; 20 – пружины; 21 – башмак; 22 – приспособления для вытаскивания оси и перевалки; 23 – гидроцилиндры.  
 Рисунок 1.11 – Рабочая клеть трубопрокатного стана винтовой прокатки 1965 года: (а) – поперечное сечение; (б) – уравнивающее устройство.

Основными недостатками такой клетки является то, что она не имеет достаточной жёсткости, так как большое число подвижных соединений (кассеты со сферическими опорами – подвижная траверса – барабан – станина) предопределяет значительные зазоры, которые не могут быть выбраны, снижают точность настройки очага деформации и при наличии динамических нагрузок уменьшают долговечность и надёжность основных узлов клетки.

Также довольно известна другая трёхвалковая рабочая клеть 1962 года, использовавшаяся для раскатки, обкатки и калибровки труб. Её особенностью является то,

что для одновременной для всех валков установки требуемого угла раскатки, она снабжена нажимным механизмом, состоящим из трёх винтов, соединённых между собой посредством цилиндрическо-глобоидальных редукторов и конических зубчатых передач [61]. Её конструкция представлена на рисунке 1.12.

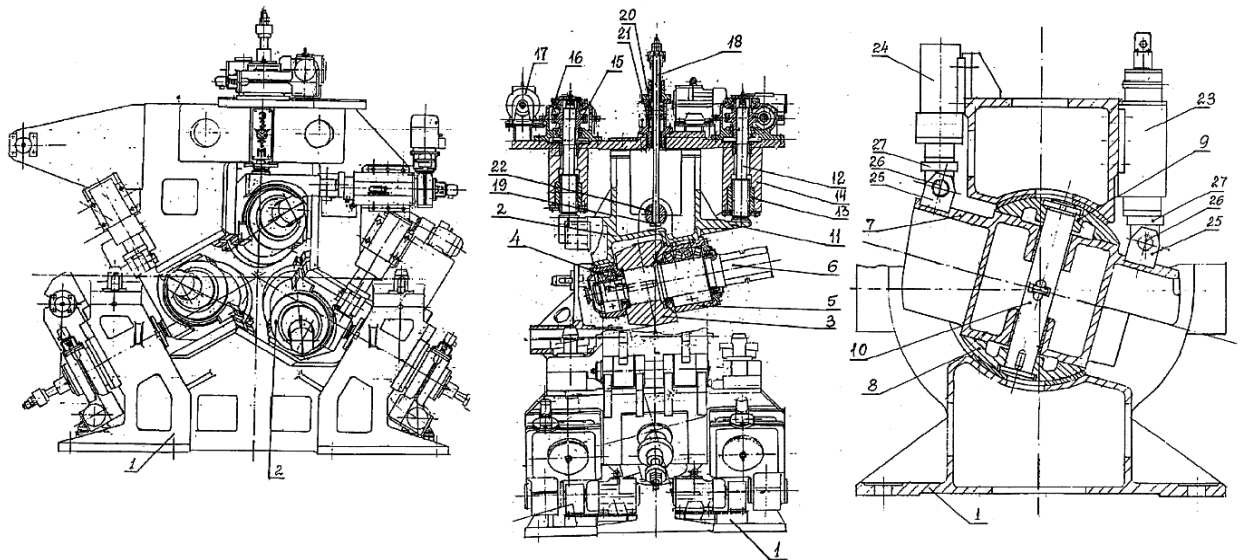


1 – валок; 2 – ось валка; 3 – конические роликоподшипники; 4 – стаканы с шаровой наружной поверхностью; 5 – нажимной винт; 6 – электродвигатель; 7 – электродвигатель; 8 – трансмиссионные валки с коническими зубчатыми передачами, обеспечивающие синхронную работу нажимных винтов всех валков; 9 – расцепная муфта для отдельной настройки валков; 10 – неподвижная часть станины; 11 – подвижная часть станины, которая может вращаться для изменения угла подачи; 12 – редуктор с двумя винтами для поворота подвижной части станины; 13 – труба.

Рисунок 1.12 – Трёхвалковая рабочая клетка для раскатки, обкатки и калибровки труб.

Недостаток этой трёхвалковой клетки заключается в том, что наличие сфер на опорах валков отрицательно сказывается на работоспособности клетки, её производительности и качестве выпуска труб, так как они являются источниками появления зазоров в клетке из-за интенсивного износа контактирующих поверхностей, снижающих жёсткость клетки.

Известна трёхвалковая клетка стана винтовой прокатки 2007 года, имеющая возможность изменения как угла подачи, так и угла раскатки и позволяющая получать качественные трубы (гильзы) при высокой производительности благодаря увеличению жёсткости клетки [62]. Её конструкция представлена на рисунке 1.13.

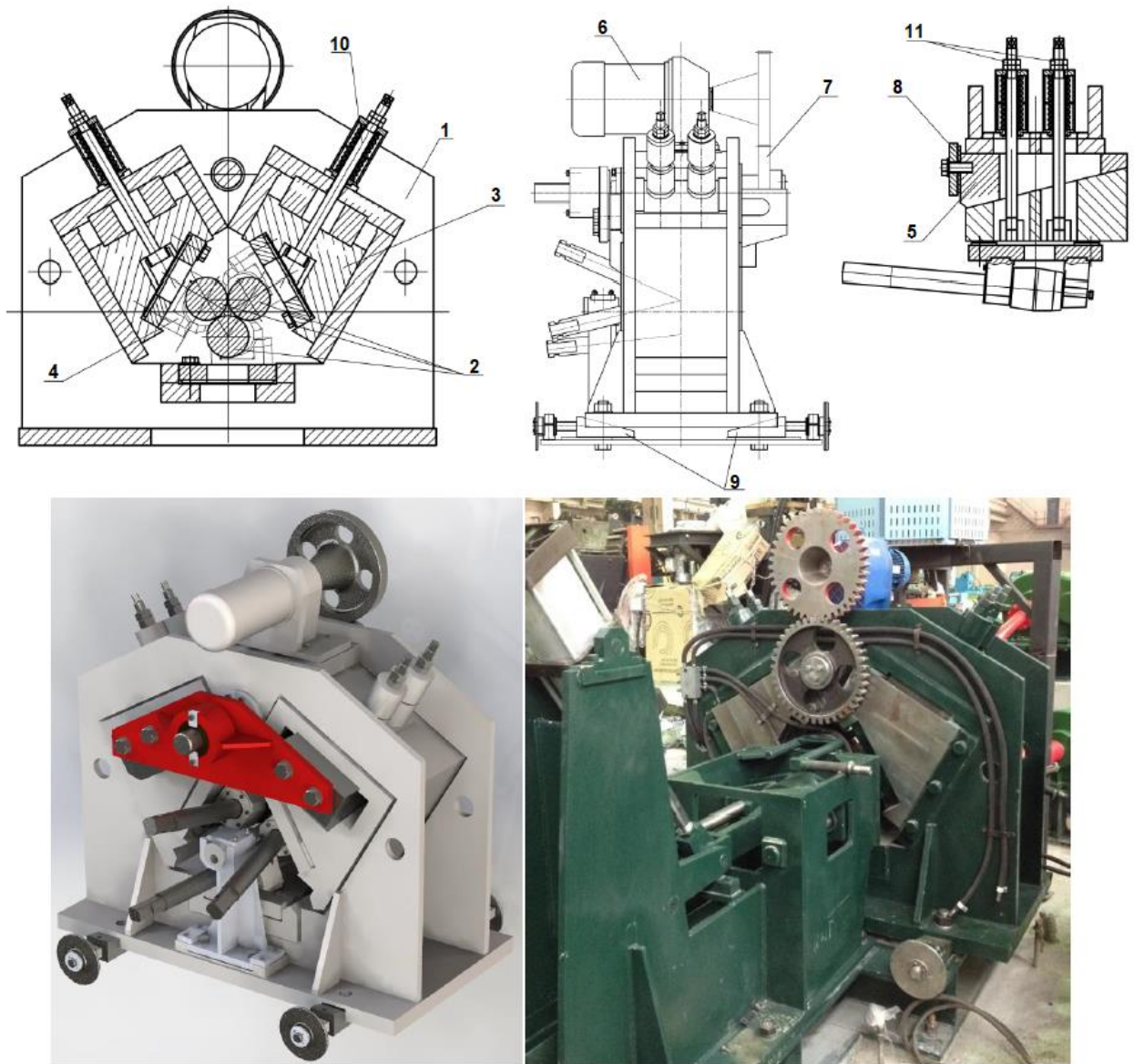


1 – станина; 2 – барабан; 3 – рабочие валки; 4 – подшипниковая опора; 5 – подшипниковая опора; 6 – вал; 7 – кассета; 8 – нижняя часть барабана; 9 – верхняя часть барабана; 10 – ось соединяющая части барабана; 11 – противоположно расположенный прилив; 12 – нажимной винт; 13 – гайка; 14 – корпус; 15 – червячное колесо; 16 – редуктор; 17 – электродвигатель; 18 – приводная тяга; 19 – молотковая головка; 20 – поршень; 21 – гидроцилиндр; 22 – цилиндрическая ось; 23 – нажимной упор; 24 – плунжерный гидроцилиндр; 25 – кронштейн; 26 – оси; 27 – башмак

Рисунок 1.13 – Трёхвалковая клеть стана винтовой прокатки.

Высокая жёсткость данной клетки обеспечена исключением большого количества подвижных соединений, принятых для такого типа клеток, а каждый валок жёстко смонтирован в кассете барабана. Барабан при этом имеет возможность регулирования в двух взаимно перпендикулярных плоскостях для изменения угла подачи и раскатки.

Также существует трёхвалковой прошивной министан «30-80» предназначенный для горячей прошивки заготовок в гильзу с дном. Он включает в себя рабочую клеть, главный привод рабочих валков, приёмно-задающий стол, а также выходную сторону. Рабочая клеть трёхвалкового министана «30-80» винтовой прокатке представлена на рисунке



1 – станина; 2 – рабочие валки; 3 – кассета; 4 – подушка валка; 5 – клин; 6 – мотор-редуктор; 7 – зубчатое зацепление; 8 – траверза; 9 – клинья; 10 – тяга; 11 – затяжные гайки  
Рисунок 1.14 – Рабочая клеть трёхвалкового министана винтовой прокатки «30-80».

Кассета с рабочим валком состоит из непосредственно кассеты 3 с расточками, в которых установлен рабочий валок с подушками 4. Подушки рабочего валка фиксируются в расточках кассеты с помощью выступов. Валок смонтирован в подушках на подшипниках скольжения, смазка которых осуществляется через отверстия в подушках от индивидуальной смазочной станции. Нижний валок является стационарным.

Клиновой нажимной механизм 5–8 предназначен для одновременного перемещения кассет с валками при изменении величины раствора калибра [63, 64], восприятия усилия прокатки и передачи его на станину. Нажимной механизм включает в себя два клина 5 с

общим приводом, состоящим из мотор-редуктора 6, зубчатого зацепления 7, пары винт-гайка и траверзы 8, которая соединена с клиньями при помощи болтов.

Установка клетки на ось прокатки при переходе на другой диаметр заготовки осуществляется при помощи четырех клиньев 9, установленных между основанием станины и рамой (рисунок 1.14). Перемещение клиньев осуществляется вручную путем вращения винта внутри стационарно закрепленной гайки. После установки клетки осуществляется затяжка болтов, которые крепят рабочую клетку к стационарной раме.

Уравновешивающее устройство служит для выбора зазоров между нажимными клиньями и кассетой, и закреплено на станине. Прижим кассеты с валком к клину обеспечивается с помощью двух подпружиненных тяг 10. Пружины предварительно заневоливаются гайками 11 на усилие, превышающее вес кассеты с рабочим валком и шпинделем, благодаря чему выбираются зазоры между клиньями и кассетой.

Особенностью министана является его мобильность, компактность и отсутствие необходимости монтажа на силовом фундаменте.

Также стоит отметить существующие конструкции трёхвалкового министана винтовой прокатки «14-40» и двухвалкового прошивного министана винтовой прокатки «20-40». Конструкция данных станков представлена на рисунке 1.15.

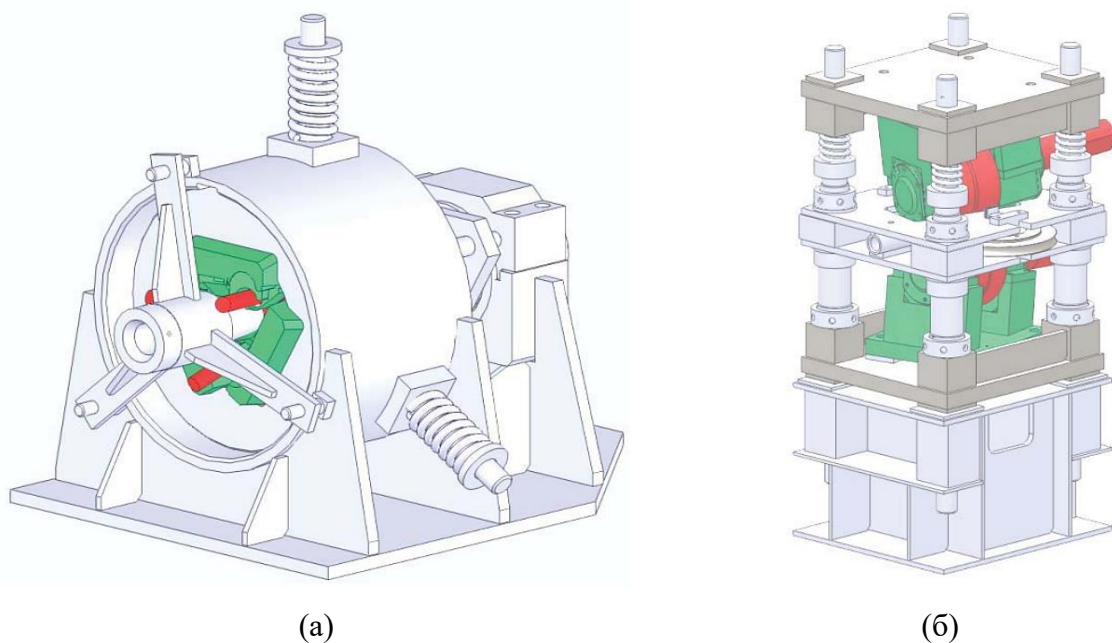


Рисунок 1.15 – (а) Трёхвалковый министан винтовой прокатки «14-40»; (б) – двухвалковый прошивной министан винтовой прокатки «20-40».

На рисунке 1.16 представлен министан РСП 20-45 оригинальной конструкции. Рабочая клетка состоит из основания и двух боковых стенок, соединенных тягами. В стенках

под определенным углом выполнены отверстия для монтажа направляющих осей, вдоль которых перемещается кассета с рабочим валком. Отличительной особенностью конструкции является осевая настройка валков. При этом в клети не предусмотрено нажимного устройства, воспринимающего усилия прокатки и устройства уравнивания валков, что существенно упрощает конструкцию и сокращает количество деталей в клети. Вместе с тем, можно отметить и ряд недостатков: сложность расчета калибровок при отсутствии конструктивного угла подачи.



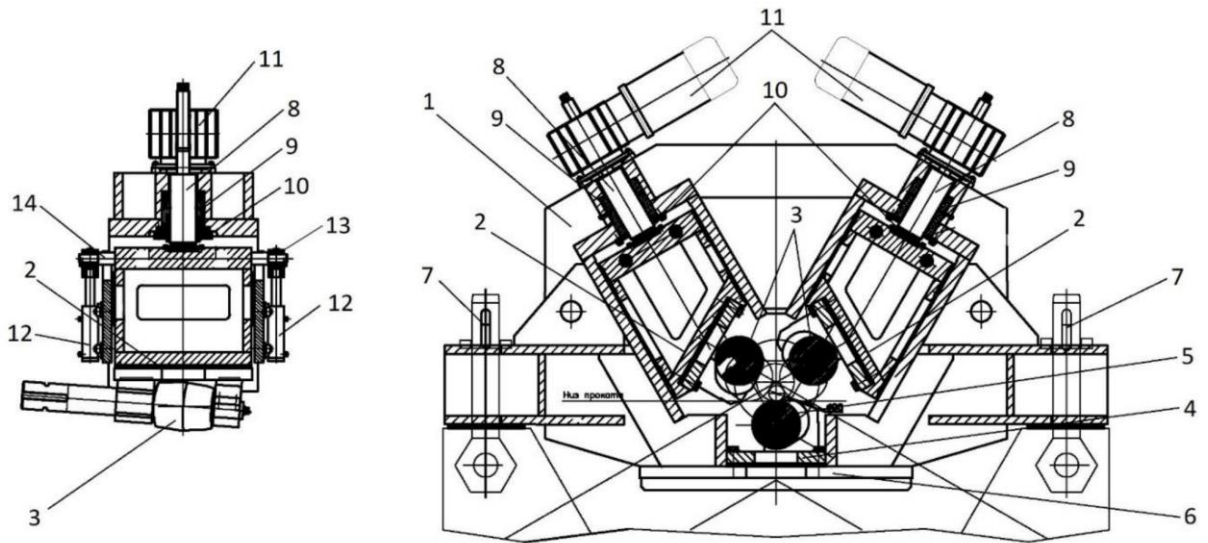
Рисунок 1.16 – (а) министан РСП 20-45; (б) рабочая клеть с компоновкой валковых узлов

Данные министаны нового типа отличает пониженная металлоёмкость, достаточно низкие энергозатраты и значительная простота эксплуатации по сравнению с мелкосортными станами продольной прокатки, что делает их привлекательными для предприятий малого и среднего бизнеса, работающих в области металлургии и машиностроении.

При разработке таких новых министанов применяется новый системный подход к созданию конструкций клетей на основе единой конструкторско-технологической системы «деформация металла – конструкция стана», обеспечивающей получение изделий с заданными характеристиками.

В основу новых конструкций клетей были положены следующие принципы: использование станины закрытого типа, расположение рабочих валков при постоянных углах подачи и раскатки, вывод исполнительного механизма установки валков из-под прямого действия усилия прокатки; что не только упрощало конструкцию министана, но и условия его эксплуатации [65].

Также, известна разработанная и внедрённая в условиях ПНТЗ сменная клеть РСП, установленная на трубопрокатном агрегате раскатного стана ТПА-160, и позволяющая реализовать технологические режимы прокатки непрерывнолитых заготовок из углеродистых и легированных сталей с коэффициентов вытяжки до 3,0 [66]. Данная клеть выступает в роли сменного дополнительного оборудования к существующему стану ТПА-160. При этом монтаж клетки в линию раскатного стана и последующий возврат раскатной штатной клетки не превышает времени перевалки валков, что значительно упрощает её эксплуатацию. Описанная клеть представлена на рисунке 1.17.



1 – станина; 2 – кассета в сборе; 3 – верхние валки; 4 – кассета; 5 – нижний валок; 6 – пластина опорная; 7 – ось поворотная (штатной клетки раскатного стана ТПА-160); 8 – винт; 9 – гайка; 10 – подпятник; 11 – мотор-редуктор; 12 – гидроцилиндр; 13 – траверса; 14 – штанга.

Рисунок 1.17 – Трёхвалковая специализированная клеть винтовой прокатки.

### 1.3 Выводы по главе 1

В главе описаны несколько современных методов компьютерного моделирования, которые используются при инжиниринге металлургического оборудования – параметрическое моделирование и метод топологической оптимизации. Производство без использования лучших технологий цифрового моделирования будет менее конкурентоспособно по сравнению с производствами, которые внедрили эти технологии в свои бизнес-процессы. В таких обстоятельствах применение параметрического моделирования и топологической оптимизации становится не столько конкурентным преимуществом, сколько одним из условий для выживания компаний.

Проведён анализ общих конструктивных характеристик трёхвалковых клеток винтовой прокатки. Была описана краткая история создания трёхвалковых клеток винтовой

прокатки и отличительных особенностей конструкции трёхвалковых раскатных станов винтовой прокатки и клетей для обжата НЛЗ и прокатки прутков.

Исходя из проведённого анализа можно сделать вывод, что главное отличие трёхвалковых клетей винтовой прокатки состоит в механизмах, используемых для сведения и разведения валков, а также регулирования и установки угла подачи. Данные механизмы могут значительно отличаться друг от друга в зависимости от производимого сортамента продукции. Так, например, если данные механизмы обладают большим числом подвижных соединений (червячных передач и т.п.), то клеть будет обладать большой массой, габаритами и достаточно низкой жёсткостью, что значительно увеличит допускаемые зазоры и снизит точность настройки очага деформации.

Помимо этого, клетки могут значительно отличаться механизмами, используемыми для осуществления перевалки (замены валков). В некоторых клетях у станины имеется откидная крышка, позволяющая получить доступ к двум верхним валкам и заменить их. В иных станах предусмотрено расцепление валков, позволяющее демонтировать их из станины через окна и заменить.

Также станы могут отличаться устройством приводов валков и нажимных устройств. Некоторые станы работают от одного нажимного винта с одним приводом, что позволяет всем валкам работать синхронно, используя механические передачи. Иные станы имеют отдельные приводы и винты для каждого валка, что позволяет настраивать их индивидуально.

Угол подачи трёхвалковых клетей винтовой прокатки может регулироваться как перемещением валков в кассете клетки, так и вращательным движением барабана валка. Также существуют клетки, где изменение угла подачи без перевалки невозможно, что значительно усложняет эксплуатацию таких клетей, а также, учитывая ограниченный набор валков для таких клетей, ограничивает выпускаемый сортмент продукции.

Разведение и сведение валков может осуществляться с помощью одного или нескольких нажимных устройств. В некоторых случаях, кассета с валком может двигаться сразу в двух осях, что увеличивает возможности по настройке конфигурации прокатного стана, но снижает жёсткость конструкции.

Отдельно можно выделить министаны, которые, сохраняя разнообразие описанных выше полноразмерных станов, обладают высокой мобильностью, компактностью и достаточной жесткостью за счет отсутствия дополнительных механизмов настройки и перемещения валков.

В качестве основных условий прототипирования, требуемых для проведения дальнейшего исследования, выбрано использование конструкции министанов с блочной

конструкцией и нерегулируемым заданным углом подачи и раскатки. В качестве основных подходов для проектирования можно выделить масштабируемость по типоразмерам, а также модульное создание от очага деформации к станине и общему виду и использование параметризации, как основы для автоматизации.

## ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Постановка цели и задач исследования

Выбранные для исследования миницилиндры винтовой прокатки, как и любые полноразмерные станы, или любое комплексное современное инженерное оборудование, требуют высоких трудозатрат на разработку, проектирование и изготовление. Их разработка, как правило, осуществляется под конкретные прикладные задачи и требования, определяемые заказчиком оборудования, выраженные в сортаменте продукции, размерами исходных заготовок, используемыми материалами, производительности, производственной площади, т.е. общими размерными габаритами оборудования.

Использование современных методов автоматизированного проектирования может позволить значительно сократить производственный цикл разработки такого оборудования, а также сократить инженерные трудозатраты, требуемые для проработки и создания технической документации такого промышленного оборудования.

В таком случае, главной целью данного исследования является разработка автоматизированного программного алгоритма проектирования рабочей клетки трехвалковой винтовой прокатки с применением современных методов инжиниринга и автоматизированного проектирования, применив который будет возможно в кратчайший срок перейти от исходных требований заказчика оборудования к полноценной функциональной программной модели рабочей клетки, выполненной в одной из программных сред САД систем.

При этом реализация данного алгоритма в какой-либо программной среде является необходимостью, так как современное проектирование промышленного оборудования больше не выполняется без использования САД систем. Достичь достаточного уровня автоматизации можно исключительно используя современные методы проектирования.

Таким образом, для достижения поставленной цели исследования требуется решить следующие основные задачи:

- проведение анализа существующих конструкций клеток винтовой прокатки и их особенностей на основании литературного обзора и патентного поиска;
- определение зависимостей размеров, формы и взаимного контакта между основными узлами и деталями рабочей клетки;
- выбор и компиляция расчетных методик для получения данных, необходимых для реализации проектирования и проведения проверочных расчетов;

- разработка алгоритма автоматизированного параметрического проектирования трёхвалковой клетки винтовой прокатки и создание с его помощью трехмерной параметрической модели рабочей клетки;
- проведение проверочных расчетов, проверка устойчивости модели и работоспособности алгоритма в условиях варьирования основных технологических параметров и входных данных;
- разработка комплекта преднастроенных шаблонов для автоматической генерации рабочей конструкторской документации (РКД) деталей и сборочных единиц клетки.

## 2.2 Выбор метода автоматизированного проектирования и САД системы

С учётом необходимости создаваемой в соответствии с разрабатываемым алгоритмом модели к адаптивному перестроению по набору исходных данных от заказчика наиболее целесообразно использовать метод параметризации.

Современные САД системы обладают обширными встроенными возможностями по параметризации. Они позволяют создавать широкий набор параметров, которые могут быть статическими (как значение), расчётными (выраженные в виде математических формул, которые, в свою очередь, могут использовать статические параметры) или ссылочными (когда параметр ссылается на действительное значение имеющейся геометрии, чтобы быть использованным в иных геометрических узлах). САД системы позволяют привязывать строящуюся геометрию к созданным параметрам любого вида и, таким образом, создавать семантические связи между узлами проектируемого оборудования.

Также современные стандарты САД систем позволяют автоматически создавать ассоциативные связи типа parent-child, где родительский и дочерний элемент связаны и зависимы друг от друга. В таких связях существование родительского элемента является необходимостью для существования дочернего элемента. При удалении родительского элемента дочерний элемент невозможно будет построить, и система потребует ручную корректировку дочернего элемента или же его полное удаление. Например, в случае построения технологического отверстия на грани твёрдого тела в качестве родительского элемента будет выступать грань твёрдого тела, а в качестве дочернего – технологическое отверстие. При удалении твёрдого тела будет также удалена его отдельная грань. В таком случае система не сможет определить расположение технологического отверстия, потому что необходимая грань отсутствует.

Помимо этого, САД системы имеют широкие возможности по повторному использованию ранее созданных деталей и узлов. Однажды созданная и сохранённая

геометрия может использоваться во множестве моделей/сборок без необходимости повторного построения геометрии. Это позволяет создавать связи между отдельными узлами и моделями. При этом может существовать неограниченное количество таких связей. Так, имея типовую деталь, используемую во множестве различныхборок, при возникновении необходимости внести изменения во все такие детали всех имеющихсяборок, будет достаточно внести изменения только лишь в саму эту деталь. Благодаря принципу наследования, данное изменение будет тиражировано во все имеющиеся сборки. В случае отсутствия критических ошибок они будут перестроены в соответствии с новыми параметрами детали.

Для разрабатываемого алгоритма модель в программной среде CAD системы должна иметь возможность адаптивно перестраиваться под разнообразный набор исходных данных проектирования, которые определены требованиями заказчика и прикладными задачами, которые он собирается решать с помощью данного оборудования. Помимо этого, в системе должна быть предусмотрена возможность автоматической генерации конструкторской документации, так как это также помогает сократить цикл разработки оборудования на его завершающих этапах.

Спроектированная модель рабочей клетки должна пройти несколько этапов проверки:

- корректности построения и сборки (проверка интерференции);
- устойчивости (корректность адаптивного перестроения во всем допустимом диапазоне варьирования исходных ключевых параметров);
- проверку на прочность для обеспечения требуемого коэффициента запаса прочности.

В рамках данного исследования разрабатываемый алгоритм будет реализован и апробирован в программной среде Autodesk Inventor, так как она удовлетворяет описанным выше требованиям, а также в ней реализованы методы автоматизированного проектирования, описанные в разделе 1.1.

## 2.3 Выбор методологии проектирования в программной среде

### 2.3.1 Общая методология программного проектирования сплошных тел и моделей

Немаловажную роль имеет выбор и использование подходящей методологии проектирования. Она позволяет выработать единый подход к построению ассоциативных связей и формированию параметрических зависимостей между отдельными узлами. Это даёт возможность формализовать методы, используемые в параметрическом моделировании, достичь стандартизации и внутренней согласованности программной

модели, и тем самым сократить затраченное на разработку время, а также максимизировать возможности по дальнейшему повторному использованию уже созданных ранее деталей и узлов.

Впервые методологии проектирования стали возникать как результат труда инженеров-проектировщиков. Методом проб и ошибок они находили закономерности в проектировании, которые позволяли им оптимизировать собственную работу для снижения затраченного времени и усилий. В дальнейшем эти закономерности были сформированы в гайдлайны – они же методички. Во многих организациях, занимающихся компьютерным моделированием, существуют методические документы, описывающие критерии программной модели, которыми модель должна соответствовать для прохождения контроля качества (QA). Как правило, такие документы не выкладывают в публичный доступ, и они могут сильно отличаться от компании к компании. Использование подходящей и хорошо продуманной методологии позволяет изменять и вносить модификации в модели в значительно более короткий срок, чем при использовании неформального подхода [67, 68].

Существуют три известных формализованных методологии построения компьютерных моделей, которые ставят своей целью придать ей бóльшую гибкость для дальнейшего повторного использования и изменения, сократить время на разработку и модификацию, а также повысить общую устойчивость модели.

Под устойчивостью в данном случае имеется в виду минимальное количество внесённых изменений в модель (корректировка статических или динамических параметров; изменений их отношений) после которых модель «сломается» из-за внутренних противоречий и перестанет функционировать как от неё требуют. В случае поломки потребуется её ручное изменение с целью устранения возникших противоречий и критических ошибок, что сказывается на общих затратах на разработку. Чем выше минимальное количество изменений модели, после которых она начинает отказывать, тем она считается более устойчивой.

Известные методологии проектирования это: горизонтальное моделирование, моделирование с явными ссылками и устойчивое моделирование. Далее каждая из них будет рассмотрена подробнее.

### 2.3.2 Методология горизонтального моделирования

Методология горизонтального моделирования (The Horizontal Modeling Methodology) – это стратегия моделирования, запатентованная Delphi Technologies [69]. Она позволяет сократить количество критических ошибок, появляющихся в результате внесения

изменений в модель за счёт устранения зависимостей внутри имеющейся геометрии и параметрах. Так, данные ошибки могут появляться в результате использования классической вертикальной древовидной структуры элементов, которая является неотъемлемой частью любой CAD системы. Вместо этого методология предлагает устранить/минимизировать количество таких зависимостей, а вместо них ссылаться на исходные элементы, не подверженные никаким изменениям – базовые плоскости и центр системы координат. Таким образом, вертикальная древовидная структура будет превращена горизонтальную (рисунок 2.1).

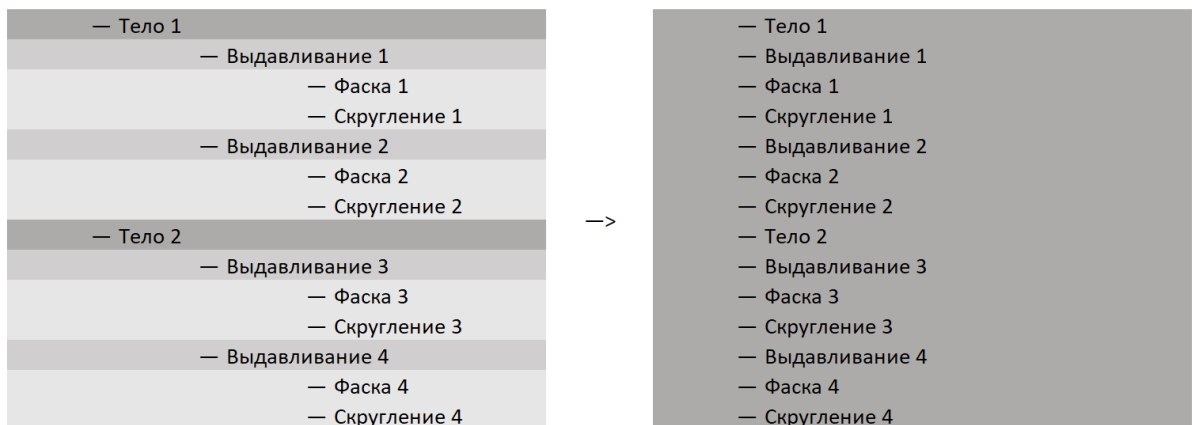


Рисунок 2.1 – Превращение вертикальной древовидной структуры в горизонтальную.

При удалении связей parent-child изменение одного узла перестанет влечь за собой изменения в связанных с ним узлах. Справедливости ради стоит отметить, что такая методология идёт вразрез с самой сутью параметрического моделирования. Наследование изменений и создание семантических связей в модели является эссенциальной частью параметрического построения программных моделей, в условиях отсутствия которой возникает вопрос о целесообразности применения метода параметризации в целом.

Также стоит отметить, что горизонтальное моделирование требует повышенных трудозатрат при построении первичной модели. Построение всех составных частей модели от базовых плоскостей и центра системы координат является далеко не тривиальной задачей. Таким образом, в концепции данной работы методология горизонтального моделирования является неприменимой, т.к. в проектируемой клетке существуют связи и зависимости между деталями, например, валок - подшипник - подушка - кассета. Однако там, где возможно определение положения деталей или плоскостей относительно общего начала системы координат или базовых плоскостей, это стоит использовать, обеспечивая повышение устойчивости модели.

### 2.3.3 Методология моделирования с явными ссылками

Методология моделирования с явными ссылками (The Explicit Reference Modelling – ERM) была предложена Боденом и другими в 2014 году [67]. Она призвана минимизировать количество зависимостей и ограничений в модели, связанных с текущей геометрией (которая склонна меняться под действием изменений всей модели), и заменить их ссылочными объектами, которые могут представлять собой или ссылаться на объекты вспомогательной геометрии. При этом, в отличие от методологии горизонтального моделирования, данная методология ставит перед собой задачу сохранения глобального замысла параметрического подхода.

Так, авторы разделяют два типа возможных зависимостей и ограничений при моделировании:

1. Зависимости и ограничения, которые можно построить без привязки к объектам существующей геометрии.

Вместо ссылок на объекты текущей геометрии в таком случае следует использовать явные ссылочные объекты – вспомогательные плоскости и прямые, которые в свою очередь будут ссылаться на базовые плоскости и центр оси координат. Ссылочные объекты в данном случае выступают в роли явной ссылки. Так, методология предлагает вместо построения элемента от имеющейся в модели грани (текущая геометрия), строить его от вспомогательной плоскости (которая в свою очередь ссылается на плоскость базовую). Вместо использования имеющегося в модели ребра, использовать вспомогательную прямую.

2. Зависимости и ограничения, которые невозможно построить без привязки к объектам существующей геометрии.

Для этой категории следует максимально сократить количество связей parent-child, для снижения взаимных зависимостей между узлами. Ряд операций финальной обработки элемента (таких, как скругление и фаска) следует выполнять как можно ближе к исходным примитивам, для уменьшения степени зависимости. В целом стоит цель уменьшения зависимостей объектов путём размещения таких элементов как можно ближе к родительским элементам или геометрическим примитивам. Это позволяет избавиться от избыточных связей и зависимостей.

Сравнение модели, использующей методологию моделирования с явными ссылками, с моделью без формализованного подхода к моделированию представлена на рисунке 2.2 [70].

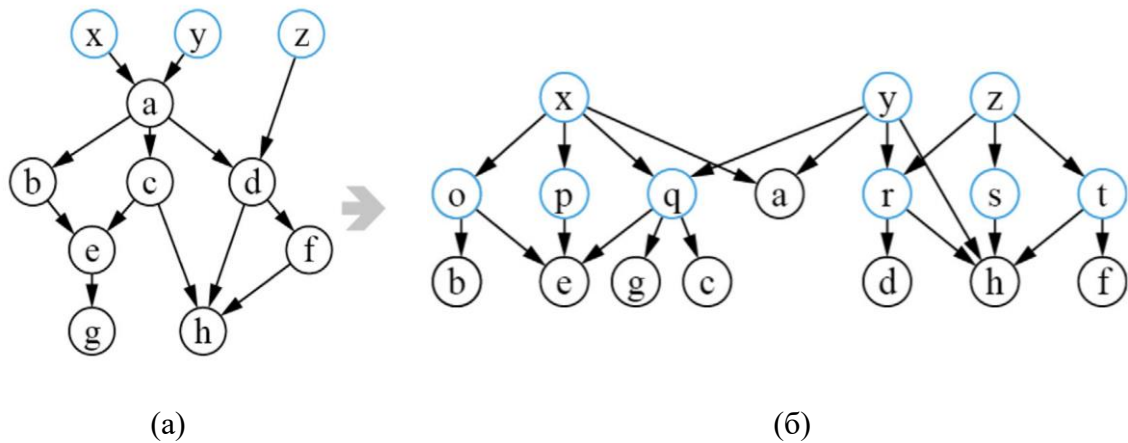


Рисунок 2.2 – Сравнение модели, использующей методологию моделирования с явными ссылками (б), с моделью без формализованного подхода к моделированию (а).

Также данная методология включает в себя использование функционального подхода, который ставит своей целью разделить создаваемую модель на части по её функциональным аспектам, и потом работать с этими частями отдельно. Так, ошибки, возникающие при совершении действий по перестроению в одной конкретной функциональной части не будут затрагивать другие функциональные части модели.

Реализация такого подхода выделяет четыре этапа, которые следует выполнить:

1. Разбивка геометрии по функциональным частям;
2. Создание явных ссылок для каждой функциональной части;
3. Создание твёрдых тел для каждой функциональной части;
4. Связь функциональных частей между собой через пользовательские параметры.

Данные этапы следует выполнять последовательно в разрезе каждой отдельной функциональной части создаваемой модели.

Исходя из анализа типовых конструкций рабочих клеток и взаимосвязей работы между отдельными узлами оборудования методология моделирования с явными ссылками будет применяться в разрабатываемом алгоритме, используя два типа описанных зависимостей. Там, где возможно, будут использоваться зависимости без привязки к объектам существующей геометрии (например, оси валков, углы подачи и раскатки). В остальных случаях будут использоваться привязки к уже созданной геометрии.

Также предполагается разбиение геометрии деталей по отдельным функциональным частям (валковый узел, нажимное устройство, уравнивающее устройство и др.) и связь данных частей через пользовательские параметры. Так, например, габариты нажимного винта и гайки зависят от рабочего диапазона хода валка, т.е. максимального и минимального размера калибра, определяемого заданным типоразмером стана. Параметры

подшипниковых втулок определяются диаметром валка и его шеек, размеры подшипников определяют габариты подушек и т.д.

#### 2.3.4 Методология устойчивого моделирования

Методология устойчивого моделирования [71] была предложена Гебхардом в 2013 [72] и фокусируется на создании устойчивых моделей, с широкими возможностями повторного использования узлов и элементов. Она предлагает оптимизировать зависимости parent-child и структурировать древовидную структуру элементов более понятным образом.

Методология основана на четырёх основных принципах:

- переименование элементов, чтобы сделать их интуитивно понятными;
- организация древовидной структуры в 8 основных разделов;
- категоризация и построение ассоциативных связей в модели в соответствии с их тенденцией к изменчивости;
- стресс-тест путём внесения изменений в критические параметры модели для проверки её устойчивости и поведения.

Данные принципы гарантируют, что передача намерений разработчика будет явным образом отражена в модели и будет доступна стороннему наблюдателю/инженеру. Единообразная организация древовидной структуры стандартизирует модели между собой и облегчает их чтение. Формирование древовидной структуры в 8 основных разделов позволяет описать тип операций, соответствующих данному конкретному разделу, а также объявить какие правила должны быть применены к данному разделу.

В разрабатываемом алгоритме предполагается присвоение наименования каждой создаваемой модели (детали) и кодирование всех её параметров. Созданные отдельные элементы модели объединяются в более крупные подгруппы и группы, что упрощает навигацию и работу с моделью. Приблизительная обобщенная структура может выглядеть следующим образом:

- деталь (валок, подшипник, подушка, кассета, тяга, нажимной винт, нажимная гайка, крышка, стенка, основание и т.д.);
- узел (валок с подушками, нажимное устройство, уравновешивающее устройство, станина);
- сборка нескольких узлов (кассета с валками);
- общая сборочная модель.

После завершения создания общей сборочной модели предполагается проведение проверочных расчетов, проверка модели на интерференцию сопрягаемых деталей и

варьирование основных исходных параметров в определенном диапазоне для проверки устойчивости полученной модели.

Таким образом, разрабатываемый алгоритм будет включать в себя основные элементы концепции всех рассмотренных методологий, кроме методологии горизонтального моделирования, которая является практически неприменимой к выбранному методу проектирования.

## 2.4 Методика построения валкового узла от очага деформации

### 2.4.1 Методика построения геометрии пространственного положения валков продольного профиля

Для построения и расчёта геометрии пространственного положения валков продольного профиля используется методика виртуальных пережимов, разработанная и предложенная для расчётов мини-станов винтовой прокатки С.П. Галкиным и др. [73]. Данная методика основана на инвариантных соотношениях геометрии станом винтовой прокатки, с учетом изменения виртуальных углов подачи и раскатки вдоль оси очага деформации. Она позволяет выполнить эффективную параметризацию габаритных размеров валков и очага деформации [74]. Выбранная методика в том числе позволяет решить обратную задачу по определению радиуса очага деформации при известном радиусе валков [75]. Методика использует схему, представленную на рис. 2.3а, где:

З – рассматриваемое сечение заготовки радиусом  $r_p$  с центром в точке О;

В – сечение валка радиусом  $R_p$  с центром в точке  $O_B$ , контактирующее в точке F с сечением заготовки З;

ОI и CL – оси прокатки (заготовки, очага деформации) и валка, соответственно;

$GG_B$  – общий перпендикуляр (эксцентриситет) длиной E к осям валка и прокатки, т.е.

$$OGG_B = CG_B G = 90^\circ;$$

OC – перпендикуляр к оси прокатки длиной P, пересекающий ось валка, т.е.  $COG = 90^\circ$ . В станах барабанного типа лежит на оси барабана;

$\beta, \delta, \gamma$  - соответственно, углы подачи, раскатки и скрещивания.

Ряд используемых понятий – технологический пережим, геометрический пережим, конструктивная схема – предложены Ю.М. Мироновым [76] и П.К. Тетериным [77]. Согласно методике, определение профиля валка по заданному профилю очага деформации сводится к расчету радиуса сечения валка, которое будет находиться в контакте с сечением

заготовки известного радиуса  $r_i$  и расположенным на известном расстоянии  $\Delta l_i$  по оси прокатки от технологического пережима (от точки O) (Рис. 2.3б).

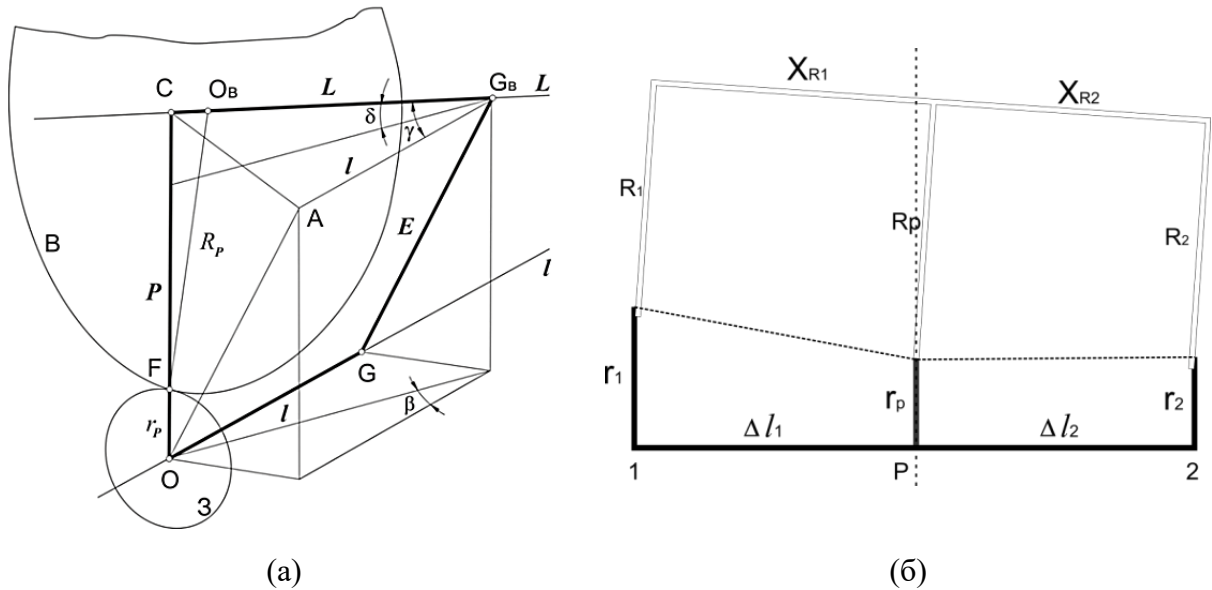


Рисунок 2.3 – Схема взаимного расположения осей валка CL и прокатки Ol (а);  
 Обозначения геометрических размеров очага деформации и валка (б): черная толстая линия – очаг деформации, двойная – валок. 1,2 - сечения входа и выхода, соответственно, P – сечение технологического пережима.

#### 2.4.2 Пример расчёта калибровки валка по очагу деформации

Далее, рассмотрим пример расчёта по выбранной методике на примере определения радиусов валка в крайних сечениях очага деформации при исходных данных для стана типоразмера «30-70» (Таблица 2.1). Диаметр валка в пережиме выбирается исходя из возможности получения минимального калибра без пересечения поверхностей валков. Для определения максимально возможного диаметра валка в пережиме с учетом углов подачи, раскатки и зазора между валками существует формула (2.1) [78]:

$$D_B^{max} = \frac{d_k^{min} - \frac{\Delta}{\cos\varphi}}{k}, \quad (2.1)$$

где  $D_B^{max}$  – максимально возможный диаметр валка в пережиме, мм;

$d_k^{min}$  – минимальный диаметр калибра в пережиме, мм;

$\Delta$  – зазор между соседними валками, мм;

$\varphi$  – угол наклона образующей входного конуса валка, градусы;

$k$  – коэффициент, связывающий диаметр валка с диаметром калибра.

Коэффициент связи  $k$  включает в себя такие параметры как угол подачи  $\beta$ , раскатки  $\delta$ , и может быть определен по формуле (2.2):

$$k = \frac{\cos\delta - 0,87\sqrt{0,75\cos\delta^2 + 0,25\cos\beta^2}}{\cos\delta\sqrt{0,57\cos\delta^2 + 0,19\cos\beta^2}}. \quad (2.2)$$

Полученное значение максимального диаметра валка далее сравнивается с двусторонним ограничением (формула 3.1) подробнее описанным в главе 3.

В дальнейшем данное условие проверяется с помощью анализа интерференции тел в САД системе. В таблице 2.1 представлены исходные данные для примера расчета.

Таблица 2.1 Исходные данные для примера расчёта.

Наименование параметра	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Угол подачи	$\beta$	град	20
Угол раскатки	$\delta$	град	5
Радиус валка в пережиме	$R_p$	мм	80
Радиус заготовки в пережиме	$r_p$	мм	15
Сечение очага деформации на входе:			
- радиус	$r_1$	мм	25
- расстояние от пережима	$\Delta l_1$	мм	80
- радиус сечения валка	$R_1$	мм	?*
- расстояние до центра сечения валка до центра сечения валка в технологическом пережиме	$X_{R1}$	мм	?*
Сечение очага деформации на выходе:			
- радиус	$r_2$	мм	16,5
- расстояние от пережима	$\Delta l_2$	мм	-80
- радиус валка	$R_2$	мм	?*
- расстояние до центра сечения валка до центра сечения валка в технологическом пережиме	$X_{R2}$	мм	?*
*данные значения будут получены в результате расчёта			

Полученных в результате расчёта данных достаточно для построения калибровки валков по трем сечениям. Результаты расчета сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 Результаты расчета параметров калибровки по трем сечениям.

Сечение	Очаг деформации (мм)		Валок (мм)	
	$\Delta l_i$	$r_i$	$XR_i$	$R_i$
Вход 1	80	25	78,001	80,512
Технологический пережим, P	0	10	0	80
Выход 2	-80	16,5	-80,320	76,034

Аналогичные расчёты калибровки валкового узла можно производить по большему количеству сечений для более высокой точности. Расчёт каждого сечения в таком случае осуществляется в соответствии с изложенной выше методикой. По приведённому алгоритму возможно сформировать таблицу калибровки валка с требуемым шагом для нарезания на станках с ЧПУ.

#### 2.4.3 Автоматизация методики виртуальных пережимов в САД-системе

Все расчётные параметры из таблиц 2.1 и 2.2 были внесены в качестве пользовательских параметров в модели Autodesk Inventor. Данные параметры являются расчётными и определяются напрямую в программной среде Autodesk Inventor. Перенос методики построения очага деформации в программную среду является необходимым условием для разработки автоматизированного алгоритма проектирования трёхвалковой клетки винтовой прокатки.

Также, в соответствии с методологией устойчивого моделирования, все использованные при расчёте геометрии очага и валка параметры были закодированы в переменные из двух символов (латинская буква и цифра). Это позволяет значительно облегчить процедуру расчёта в программной среде Autodesk Inventor.

- параметры X используются в качестве основных исходных данных для расчёта модели;
- параметры A используются для определения параметров технологического и геометрического пережимов;
- параметры B используются для определения параметров виртуального пережима в сечении 1 входа в очаг деформации;
- параметры C используются для определения параметров виртуального пережима в сечении 2 выхода из очага деформации.

Полный перечень параметров, используемых для расчёта геометрии очага и валка, а также основные формулы для реализации параметризации представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Таблица кодирования параметров.

Обознач.	Название параметра	Формула в Autodesk Inventor	Формула
<b>Исходные (основные) параметры</b>			
X1	Угол подачи $\beta$ , градусы	Явное значение (передается из программно-расчетного модуля (ПРМ))	Явное значение (20*)
X2	Угол раскатки $\delta$ , градусы	Явное значение (передается из ПРМ)	Явное значение (5*)
X3	Радиус валка в пережиме $R_p$ , мм	Явное значение (передается из ПРМ)	Явное значение (80*)
X4	Радиус заготовки в пережиме $r_p$ , мм	Явное значение (рассчитано и передается из ПРМ)	$X4 = \frac{X5}{\sqrt{\mu_{max}}}$ $\mu_{max}$ – максимальный коэффициент вытяжки за проход.
X5	Радиус $r_1$ , мм	Явное значение (передается из ПРМ)	Явное значение (35*)
X6	Радиус $r_2$ , мм	Явное значение (рассчитано и передается из ПРМ)	$X6 = X4 + 1,5$
*пример выбранных значений параметров для типоразмера клетки 30–70			
<b>Параметры технологического и геометрического пережимов</b>			
A1	Расстояние $P$ между осью прокатки и осью валка в пережиме, мм	$x4 + x3 / \cos(x2)$	$A1 = X4 + \frac{X3}{\cos X2}$
A2	Угол скрещивания $\gamma$ , градусы	$\text{acos}(\cos(x1) * \cos(x2))$	$\cos A2 = \cos X1 \cdot \cos X2$
A3	Длина общего перпендикуляра $E$ , мм	$a1 * \sin(x1) * \cos(x2) / \sin(a2)$	$A3 = A1 \frac{\sin X1 \cdot \cos X2}{\sin A2}$
A4	Расстояние $L$ между технологическим и геометрическим пережимами по оси прокатки, мм	$a1 * \sin(x2) / (\sin(a2) * \sin(a2))$	$A4 = A1 \frac{\sin X2}{\sin^2 A2}$
A5	Расстояния $I$ между технологическим пережимами по оси прокатки, мм	$a4 * \cos(a2)$	$A5 = A4 \cdot \cos A2$
A6	Расстояния $LR$ от центра сечения валка до геометрического пережима, мм	$a4 - x3 * \tan(x2)$	$A6 = A4 - X3 \cdot \tan X2$
<b>Параметры виртуального пережима в сечении 1 входа в очаг деформации</b>			
B1	Расстояние $I1$ до геометрического пережима по оси прокатки, мм	$a5 + x3$	$B1 = A5 + X3$
B2	Расстояние $L1$ до геометрического пережима по оси валка, мм	$b1 / \cos(a2)$	$B2 = \frac{B1}{\cos A2}$
B3	Расстояние $P1$ между осью прокатки и осью валка перпендикулярно к оси прокатки, мм	$\text{sqrt}((b1 * \tan(a2))^2 + (a3)^2)$	$B3 = \sqrt{(B1 \cdot \tan A2)^2 + A3^2}$
B4	Расстояние $PN1$ между осью прокатки и осью валка перпендикулярно к оси валка, мм	$\text{sqrt}((b1 * \sin(a2))^2 + (a3)^2)$	$B4 = \sqrt{(B1 \cdot \sin A2)^2 + A3^2}$

B5	Угол раскатки $\delta_1$ , градусы	$\text{acos}(b_4 / b_3)$	$\cos B5 = \frac{B_4}{B_3}$
B6	Угол подачи $\beta_1$ , градусы	$\text{atan}(a_3 * \tan(a_2) / b_3)$	$\tan B6 = \frac{A_3 \cdot \tan A_2}{B_3}$
B7	Радиус валка R1, мм	$\cos(b_5) * (b_3 - x_5)$	$B7 = \cos B5 \cdot (B_3 - X_5)$
B8	Расстояние LR1 от центра сечения валка до геометрического пережима, мм	$b_2 - b_7 * \tan(b_5)$	$B8 = B_2 - B_7 \cdot \tan B_5$
B9	Расстояние XR1 от центра сечения валка до центра сечения валка технологического пережима, мм	$b_8 - a_6$	$B9 = B_8 - A_6$
<b>Параметры виртуального пережима в сечении 2 выхода из очага деформации</b>			
C1	Расстояние l2 до геометрического пережима по оси прокатки	$a_5 + x_3 * -1 \text{ бр}$	$C1 = A_5 - X_3$
C2	Расстояние L2 до геометрического пережима по оси валка	$c_1 / \cos(a_2)$	$C2 = \frac{C_1}{\cos A_2}$
C3	Расстояние P2 между осью прокатки и осью валка перпендикулярно к оси прокатки	$\text{sqrt}((c_1 * \tan(a_2))^2 \text{ бр} + (a_3)^2 \text{ бр})$	$C3 = \sqrt{(C_1 \cdot \tan A_2)^2 + A_3^2}$
C4	Расстояние PN2 между осью прокатки и осью валка перпендикулярно к оси валка	$\text{sqrt}((c_1 * \sin(a_2))^2 \text{ бр} + (a_3)^2 \text{ бр})$	$C4 = \sqrt{(C_1 \cdot \sin A_2)^2 + A_3^2}$
C5	Угол раскатки $\delta_2$	$\text{acos}(c_4 / c_3)$	$\cos C5 = \frac{C_4}{C_3}$
C6	Угол подачи $\beta_2$	$\text{atan}(a_3 * \tan(a_2) / c_3)$	$\tan C6 = \frac{A_3 \cdot \tan A_2}{C_3}$
C7	Радиус валка R2	$\cos(c_5) * (c_3 - x_6)$	$C7 = \cos C5 \cdot (C_3 - X_6)$
C8	Расстояние XR2 от центра сечения валка до центра сечения валка технологического пережима	$c_2 - c_7 * \tan(c_5)$	$C8 = C_2 - C_7 \cdot \tan C_5$
C9	Расстояние XR2 от центра сечения валка до центра сечения валка технологического пережима	$c_8 - a_6$	$C9 = C_8 - A_6$

Для проверки корректности построенной модели используются параметры X1, X2, A2, B5, B6, C5 и C7. Для них справедливо отношение (2.3):

$$\cos(X1) * \cos(X2) = \cos(B5) * \cos(B6) = \cos(C5) * \cos(C7) = \cos(A2) \quad (2.3)$$

Для построения очага деформации в программной модели в соответствии с выбранной методикой используется 3D-Эскиз. Явные параметры этого эскиза при этом ссылаются на созданные пользовательские параметры. При корректно выстроенных зависимостях и заполненных исходных данных (параметры кодировки X) модель будет иметь 0 степеней свободы на 3D-Эскизе, т.е. построенный вариант геометрии является единственным возможным при заданных параметрах. Удаление какого-либо из исходных параметров (X) будет добавлять модели очага степени свободы.

Построенная схема взаимного положения осей валка и прокатки представлена на рисунке 2.4.

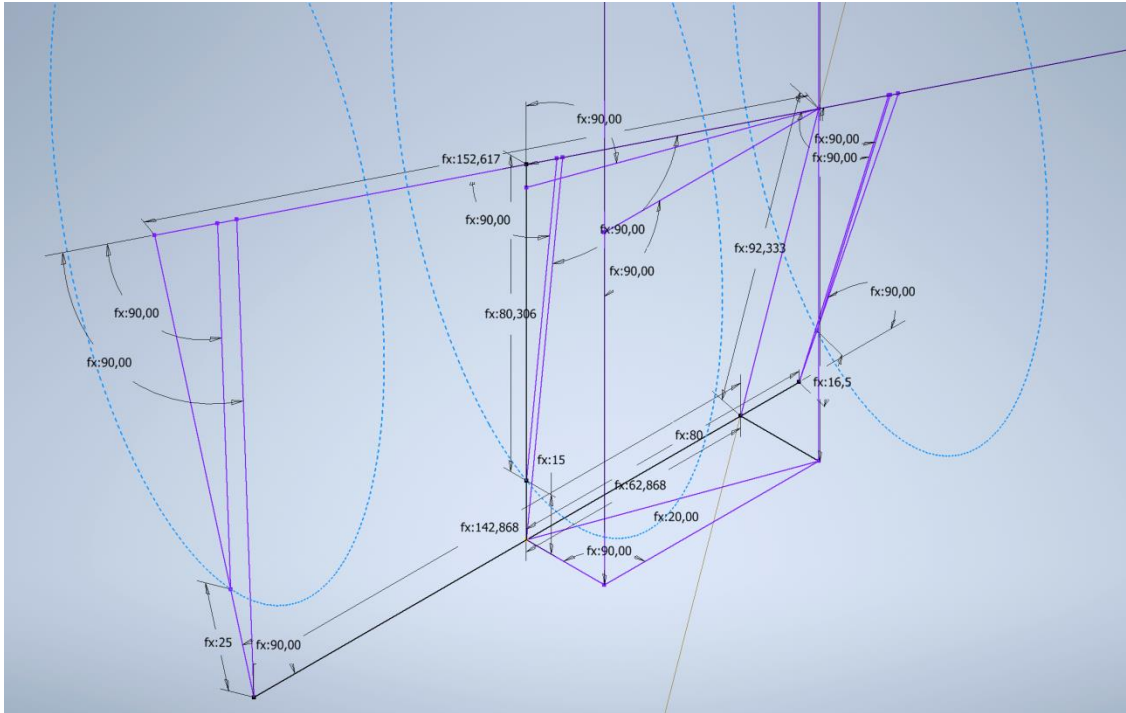
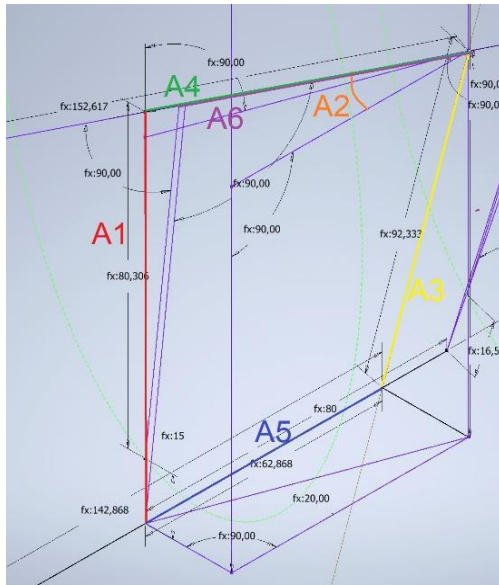


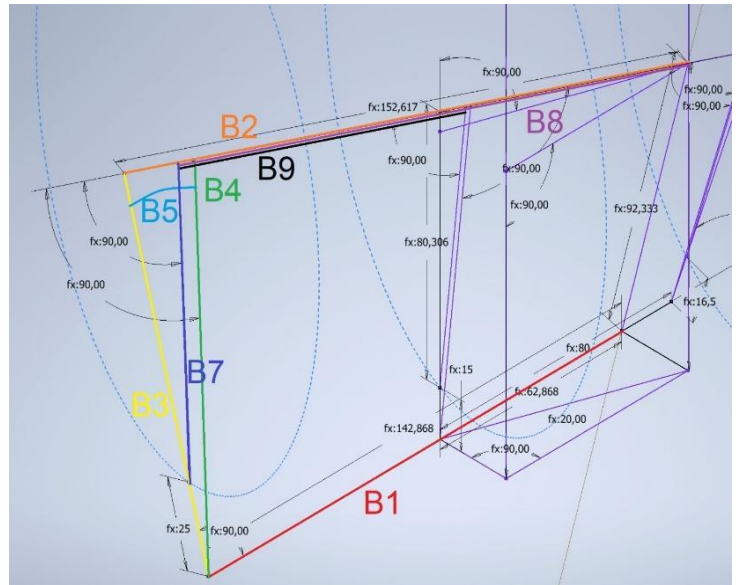
Рисунок 2.4 – Адаптивная схема взаимного положения осей валка и прокатки ( $\beta=20^\circ$ ,  $\delta=5^\circ$ ).

На рисунке 2.5 отображено наглядное представление параметров А, В, С, используемых для построения геометрического и технологического пережимов валка.

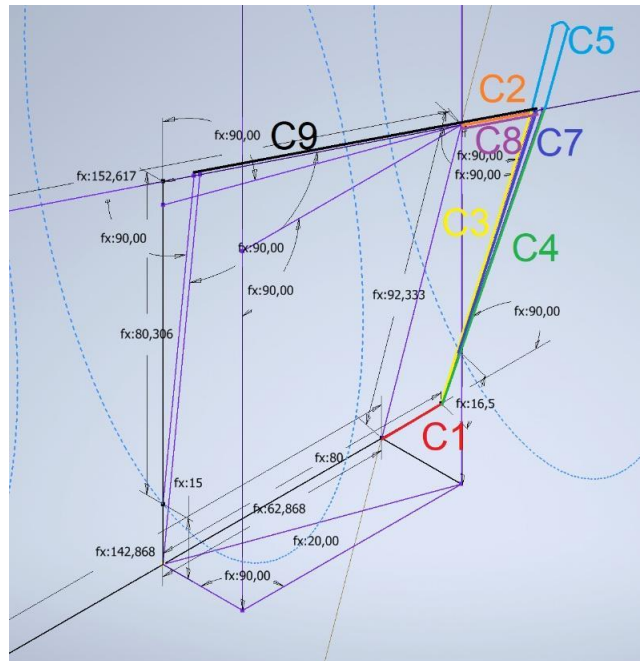
Построение очага деформации в системе происходит от технологического пережима на оси прокатки, который является общим центром координат модели О. Далее следует провести ось прокатки, проходящую через центр координат модели. По ней определяется расстояние  $l$  между технологическим и геометрическим пережимами по оси прокатки (параметр А5), чтобы получить отрезок ОG. От точки О в свою очередь проводится вспомогательная прямая, перпендикулярная отрезку ОG. По ней от точки О последовательно откладывается радиус прутка в пережиме  $r_p$  и радиус валка в пережиме  $R_p$  (параметры Х4 и Х3, соответственно) чтобы получить точку С. Отрезок СG<sub>В</sub> (А4) в таком случае будет совпадать с осью валка. После этого с помощью перпендикуляров от отрезка ОG следует построить угол подачи  $\beta$  (параметр Х1). Далее проводится вспомогательная прямая из вершины угла  $\beta$  и параллельная отрезку ОС. После этого получаем точку G<sub>В</sub> проведя эксцентриситет Е (параметр А3) от точки G до пересечения с построенной вспомогательной прямой. Остальные виртуальные пережимы строятся аналогичным образом.



(a)



(б)



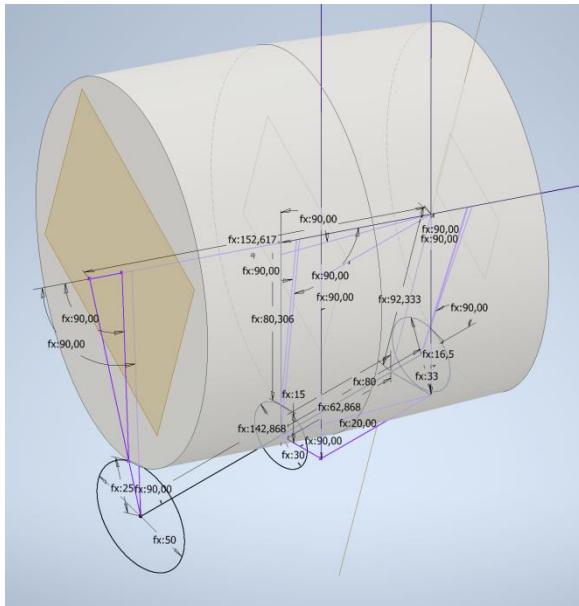
(в)

Рисунок 2.5 – Параметры, используемые для построения геометрических пережимов:

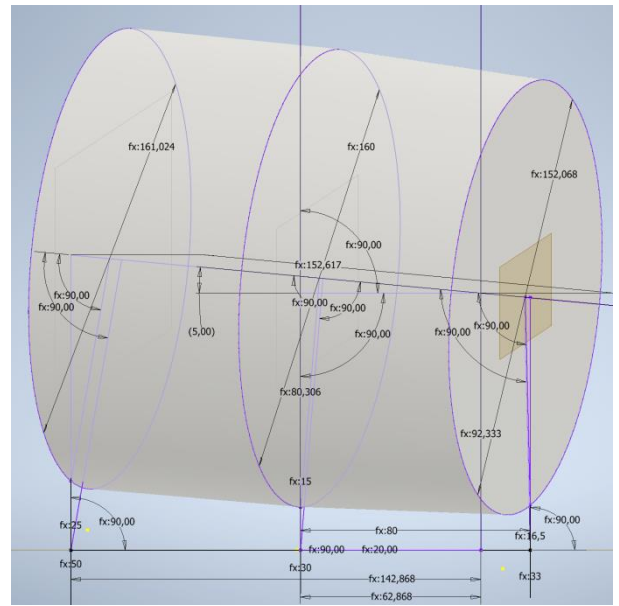
(а) – параметры А, (б) – параметры В, (в) – параметры С.

Аналогичным образом выбранная методика виртуальных пережимов может быть автоматизирована в какой-либо иной программной CAD среде.

На рисунках 2.6, 2.7, 2.8 представлены модели построенного валка-бочки для разных типоразмеров станов с помощью автоматизированной методики.

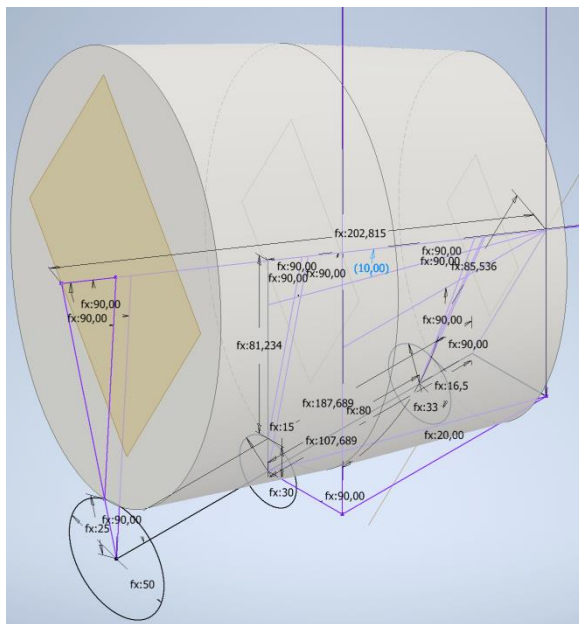


(a)

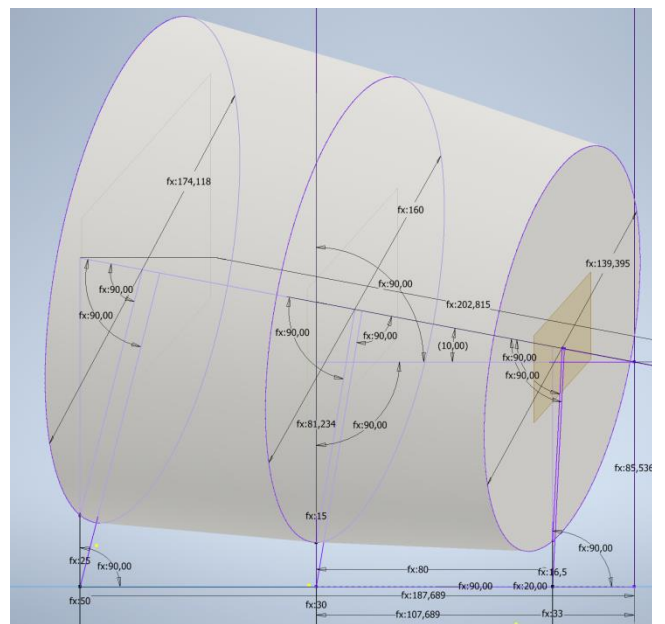


(б)

Рисунок 2.6 – Адаптивная модель построенного валка-бочки типоразмера 30–70 с углом раскатки  $\delta = 5^\circ$ : (а) – аксонометрия; (б) – вид сбоку.



(a)



(б)

Рисунок 2.7 – Адаптивная модель построенного валка-бочки типоразмера 30–70 с углом раскатки  $\delta = 10^\circ$ : (а) – аксонометрия; (б) – вид сбоку.

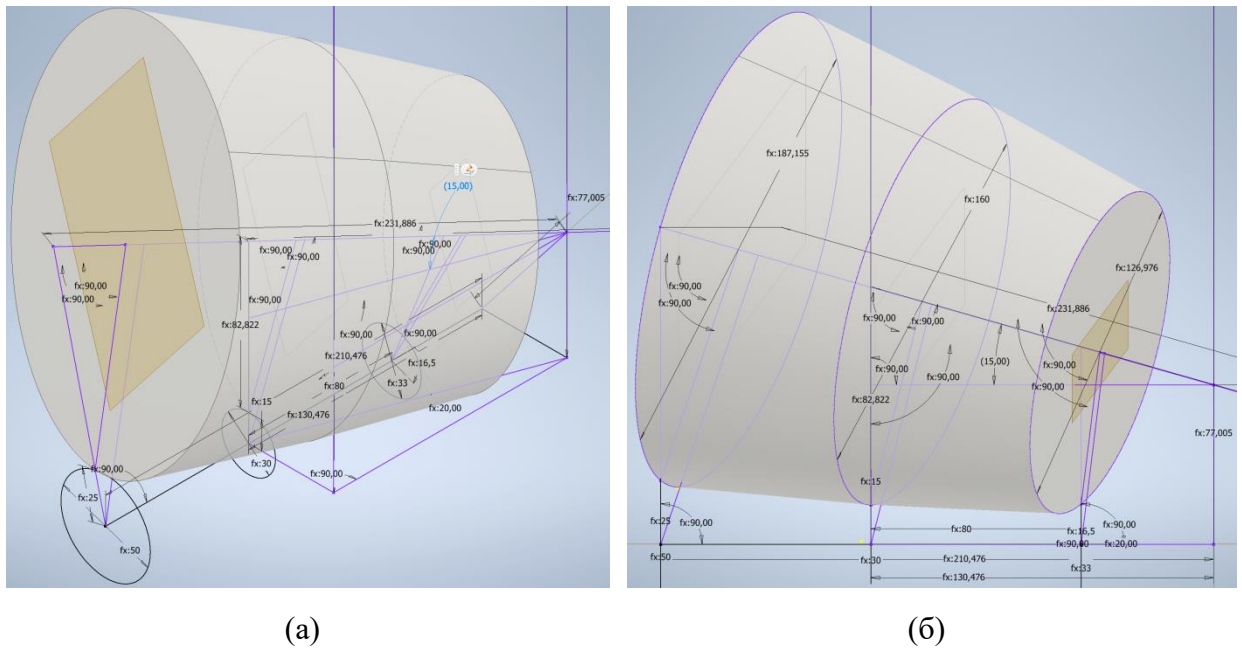


Рисунок 2.8 – Адаптивная модель построенного валка-бочки типоразмера 30–70 с углом раскатки  $\delta = 15^\circ$ : (а) – аксонометрия; (б) – вид сбоку.

Полученный в результате применения методики очаг деформации и валок могут использоваться для построения трехвалкового узла рабочей клетки и моделей детали валка. Разработанная модель применима для трёхвалковых станов, имеющих углы раскатки рабочих валков  $\delta = 5-15^\circ$  и углы подачи  $\beta = 10-25^\circ$ .

## 2.5 Выводы по главе 2

Применение алгоритма параметрического проектирования значительно облегчает задачу инженера по созданию компьютерной модели. Метод параметризации способствует ускорению проектирования валковых соединений и прокатных станов, сокращая трудозатраты инженера-конструктора на ручную корректировку деталей и отношений между узлами. Описанная методика виртуальных пережимов позволяет рассчитать и построить очаг деформации в зависимости от радиусов прокатываемой заготовки, валка, угла подачи и угла раскатки. Используя параметризацию в программной среде, возможно оперативно получить трёхмерную модель калибровки валка и очага деформации, на основании которой далее можно разработать остальные конструктивные узлы стана. Выбор подходящей методологии проектирования позволит значительно упростить применение разрабатываемого алгоритма в программной среде, достичь достаточной гибкости и устойчивости.

На основании описанного во второй главе можно сделать следующие основные заключения:

1) С учётом необходимости создаваемой в соответствии с разрабатываемым алгоритмом модели к гибкому перестроению по разнообразному набору исходных данных наиболее целесообразно использовать метод параметризации.

2) В качестве программной среды для реализации и апробации разрабатываемого алгоритма выбрана САД система Autodesk Inventor, позволяющая широко применять метод параметризации и выгружать конструкторскую документацию в виде заранее подготовленных шаблонов чертежей с оформлением по ГОСТ и ЕСКД.

3) Разрабатываемый алгоритм должен включать в себя основные элементы концепции всех рассмотренных методологий, кроме методологии горизонтального моделирования, которая является практически неприменимой к выбранному методу проектирования (параметризации). Методология моделирования с явными ссылками будет применена в разрабатываемом алгоритме. Там, где возможно, будут использоваться зависимости без привязки к объектам существующей геометрии (например, оси валков, углы подачи и раскатки). В остальных случаях будут использоваться связи с уже созданной геометрией. Методология устойчивого моделирования будет использована **в**—при наименовании каждой создаваемой модели (детали) и кодировании всех её параметров. Так, созданные отдельные элементы модели можно объединить в более крупные подгруппы и группы, что упростит навигацию и работу с моделью. Благодаря выбранным методологиям, разрабатываемая модель будет адаптивной и позволит быстро определять габаритные размеры, пространственное положение валков и очага деформации.

4) С помощью параметризации в САД системе выполнена автоматизация методики проектирования очага деформации в зависимости от исходных параметров. В основе автоматизации заложена методика виртуальных пережимов МИСИС, которая позволяет использовать инвариантные соотношения геометрии валков применительно к требуемым параметрам технологического пережима – диаметру валка и прутка, углам подачи и раскатки вдоль оси прокатки и/или оси валка.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЁХВАЛКОВОЙ КЛЕТИ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

### 3.1 Определение допущений и факторов при проектировании

Перед формулированием алгоритма проектирования стоит заранее обозначить и определить некоторые параметры и ограничения.

Базовым конструктивным параметром прокатных клеток обычно считают диаметр  $D_B$  рабочих валков, который определяет габаритные размеры рабочей клетки в целом. В случае трёхвалковых клеток винтовой прокатки для отношения диаметра валков  $D_B$  к диаметру проката  $d_n$  действует двухстороннее ограничение [79]:

$$1,9 - 2,0 \leq \frac{D_B}{d_n} \leq 5,6 - 5,7. \quad (3.1)$$

Верхняя граница отношения (5,6–5,7) определяет максимально возможный диаметр валка, обеспечивающий получение заданного наименьшего диаметра проката по условию свода валков на минимальный калибр. Исходя из нижней границы (1,9–2,0) находится максимальный диаметр проката для известного диаметра валков по условию рациональности очага деформации. При этом суммарный коэффициент вытяжки допустимый для одного комплекта валков не должен превышать

$$\mu_{\Sigma} \leq \left( \frac{5,6-5,7}{1,9-2,0} \right)^2 \leq 7,8 - 9,0. \quad (3.2)$$

Соотношения (3.1) и (3.2) положены в основу определения радиуса валка в пережиме, как одного из исходных параметров (X3).

Важно также рассмотреть вопрос связи минимального диаметра валка с его прочностью. Так, в разрабатываемом алгоритме, диаметр валка определяется минимальным диаметром прутка на выходе и максимальным диаметром заготовки на входе.

Теоретически возможна ситуация, когда с выбранным типоразмером и диаметром валка, а также соблюдении двухстороннего ограничения условия рациональности очага деформации, минимальный коэффициент запаса прочности валка не будет достигать требуемых значений. Увеличение диаметра валка для увеличения его прочности в таком случае может привести к выходу за пределы рационального условия, что повлечёт за собой контакт валковых узлов при их максимальном сведении.

В общем виде обеспечение требуемого условия по габаритам и его прочности может быть реализовано несколькими вариантами корректировки:

1. Снижение максимального обжатия за проход для уменьшения усилия.

2. Сокращение диапазона диаметров прокатываемых прутков на одном типоразмере клетки.

Для упрощения корректировки параметров типоразмера и диаметра валка на экранной форме реализована подсказка с расчётом параметров в соответствии с двухсторонним ограничением рационального условия (рисунок 3.1). Она в режиме реального времени по введённым параметрам рассчитывает отношения диаметра прутка/заготовки к валку, а также рекомендуемый диапазон радиуса валка, рассчитанный в соответствии с рациональным условием.

	Кодировка	Параметр
30		Минимальный диаметр прутка
70		Максимальный диаметр заготовки
30-70		Типоразмер
20	X1.	Угол подачи β, градусы
5	X2.	Угол раскатки δ, градусы
80	X3.	Радиус валка в пережиме R <sub>p</sub> , мм
35	X5.	Радиус прутка на входе r <sub>1</sub> , мм
10	X7.	Толщина крышки (константа), мм
0,95	X9.	Множитель для определения внешнего диаметра крышки (относительно диаметра валка на входе или выходе)
3		Коэффициент вытяжки за проход, абс

10	X8.	Толщина втулки (параметр), мм
1,5	X11.	Множитель для определения длины шейки (относительно диаметра шейки)

60	X15.	Диаметр нажимного винта, мм
90	X16.	Диаметр гайки (внешний), мм

5,33	D <sub>в</sub> /d <sub>п</sub> для минимального диаметра прутка
2,29	D <sub>в</sub> /d <sub>п</sub> для максимального диаметра заготовки
70 - 84	Рекомендуемый диапазон X3 для выбранного типоразмера

Исходные данные

Параметры X8 и X11 выбираются на основе результата прочностных расчётов отдельной модели втулки

Результат расчёта винта

Справочные расчётные данные для проверки двухстороннего ограничения, связанного с невозможностью сведения валков

$$1,9 - 2,0 \leq \frac{D_{в}}{d_{п}} \leq 5,6 - 5,7.$$

Рисунок 3.1 – Рекомендательная таблица (красная рамка) с расчётом параметров в соответствии с двухсторонним ограничением рационального условия.

Кроме этого, на первоначальном этапе проектирования имеет смысл принимать во внимание и другие, более общие факторы, которые могут отличаться в зависимости от условий эксплуатации оборудования и влиять на выбор конструкторских решений. Основные из них следующие:

1) *Сортамент продукции.* В случае станов винтовой прокатки основными размерами является диаметр и длина производимого прутка. Слишком широкий диапазон по диаметру значительно усложнит конструкцию рабочей клетки, потребует большого рабочего хода механизмов позиционирования валков и других элементов клетки. Существующий опыт эксплуатации станов винтовой прокатки показывает, что деление на типоразмеры может быть различным, и в основном зависит от необходимых размеров продукции. Так,

например, изготовлены и внедрены трехвалковые станы винтовой прокатки следующих типоразмеров: 10–30, 14–40, 25–45, 30–70, 30–80, 40–120, 90–220 [35, 80].

2) *Требуемая точность и качество поверхности прокатываемого материала.* Чаще всего, требования к прокату регламентированы нормативной документацией (ГОСТ, технические условия). В случае повышенных требований по точности (отклонению по диаметру, овальности, кривизне, шероховатости поверхности), необходимо учесть это при проектировании калибровки валков и выборе материала, а также обеспечить повышенную жесткость валковой системы и всей рабочей клетки.

3. *Производительность.* Необходимо учитывать требуемую производительность стана при выборе параметров, чтобы обеспечить достаточную скорость прокатки с учетом требуемых температурно-скоростных условий деформации. Производительность может быть предварительно определена на основе данных о диаметре валка, угле подачи, частоте вращения валка, а также требуемой длине прутков.

4. *Стандарты безопасности и удобство эксплуатации.* Конструкция стана должна обеспечивать безопасную работу и обслуживание оборудования, удобный доступ ко всем узлам и устройствам, возможность быстрой и удобной перевалки и ремонта стана.

5. *Затраты на изготовление и обслуживание.* По возможности, проектирование должно выполняться с учетом унификации узлов оборудования, выборе стандартных или типовых запасных частей и расходных материалов, экономичных способов сборки и изготовления деталей, выборе более дешевых материалов там, где это возможно и не влияет на безопасность и работоспособность оборудования.

На практике часто необходимые данные становятся известны только в процессе проектирования и могут уточняться или изменяться. В результате технический проект требует переработки, дополнительных трудовых и временных затрат. В данном случае очевидно, что адаптивные параметрические модели, позволяющие вносить корректировки в технический проект практически на любом этапе и автоматически подстраивающиеся под изменяющиеся требования являются обоснованными и более эффективными решениями для конструкторских разработок.

### 3.2 Разработка алгоритма проектирования

#### 3.2.1 Общий вид разработанного алгоритма проектирования

Проектирование трёхвалковой клетки винтовой прокатки по разработанному алгоритму происходит в несколько последовательных этапов, каждый из которых использует геометрию, рассчитанные параметры и зависимости геометрических узлов из

предыдущих этапов. Ранняя версия разработанного алгоритма была представлена в работе [81]. Разработанный алгоритм использует принцип итерационности – предполагает возврат на предыдущие этапы, в случае непрохождения этапа валидации или корректировки каких-либо параметров. Общая схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 3.2.

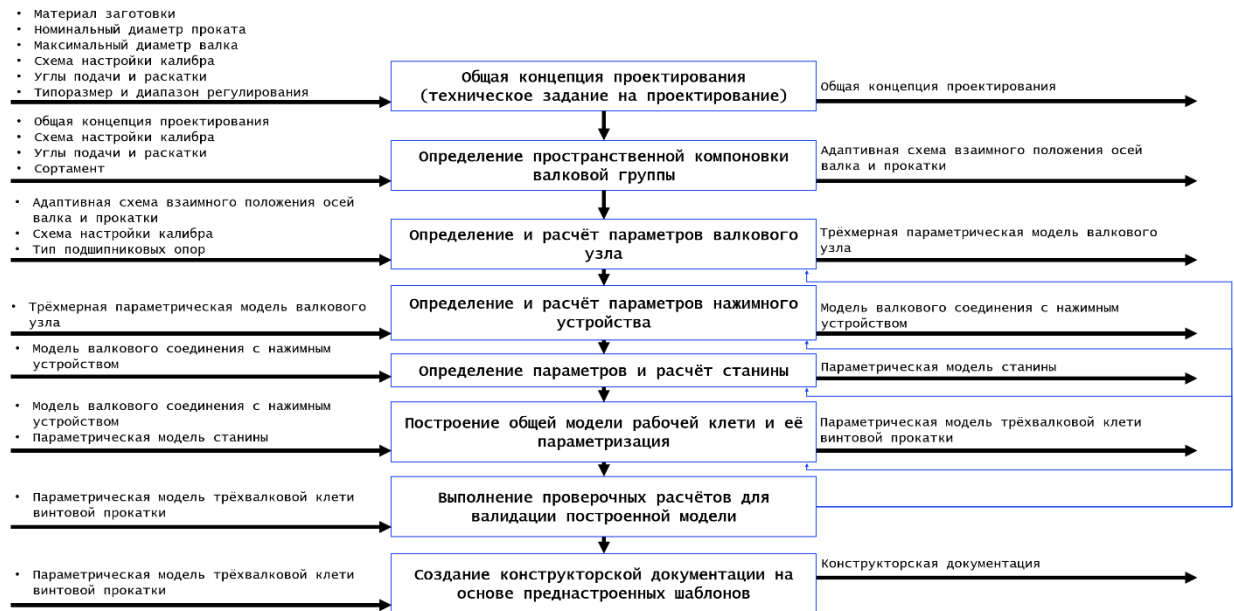


Рисунок 3.2 – Общая схема разработанного алгоритма проектирования трёхвалковой клетки винтовой прокатки.

При разработке алгоритма проектирования были сформулированы и учтены следующие основные подходы:

1. Алгоритм основан на применении автоматизированного параметрического проектирования и принципов нескольких методологий (ассоциативные связи «Parent-child», принцип наследования, кодировка параметров, применение стресс-тестов для проверки устойчивости).
2. Создание модели от очага деформации к станине и общему виду (проектирование «снизу-вверх»).
3. Масштабируемость модели или ее адаптивность (несколько типоразмеров, 10–30, 30–70, 60–160, 140–220 или другие, исходя из требований сортамента).
4. Модульный подход к проектированию (сборка из типовых блоков, взаимозаменяемость).
5. Удобство сборки/разборки и обслуживания.
6. Высокий уровень механизации и автоматизации (возможность установки систем смазки, охлаждения, датчиков).

7. Применение методик автоматизированного прочностного расчета на основе метода конечных элементов (МКЭ) для оптимизации основных габаритов и формы деталей оборудования, выбора материалов и проверочных расчетов.

Каждый этап алгоритма в общем виде рассмотрен далее в отдельных разделах данной главы. Для каждого функционального блока приведены входные данные, необходимые для его выполнения, а также выходные данные, получаемые в результате его реализации.

Общая архитектура построенной по алгоритму модели представлена на рисунке 3.3. Модель состоит из расчётного блока, в котором выполняются основные вычисления, и проектного блока, в котором отображаются сформированные узлы и детали. В расчётном блоке в MS Excel в ПРМ вводятся основные исходные данные и калькулируются параметры, которые передаются в параметрическую таблицу Autodesk Inventor для автоматического построения и конфигурации модели. Также расчетный блок включает модули для определения максимальных нагрузок, и расчеты геометрии подшипниковых втулок. Реализована автоматическая интеграция между расчётным и проектным блоком, для передачи основных данных и их визуализации.

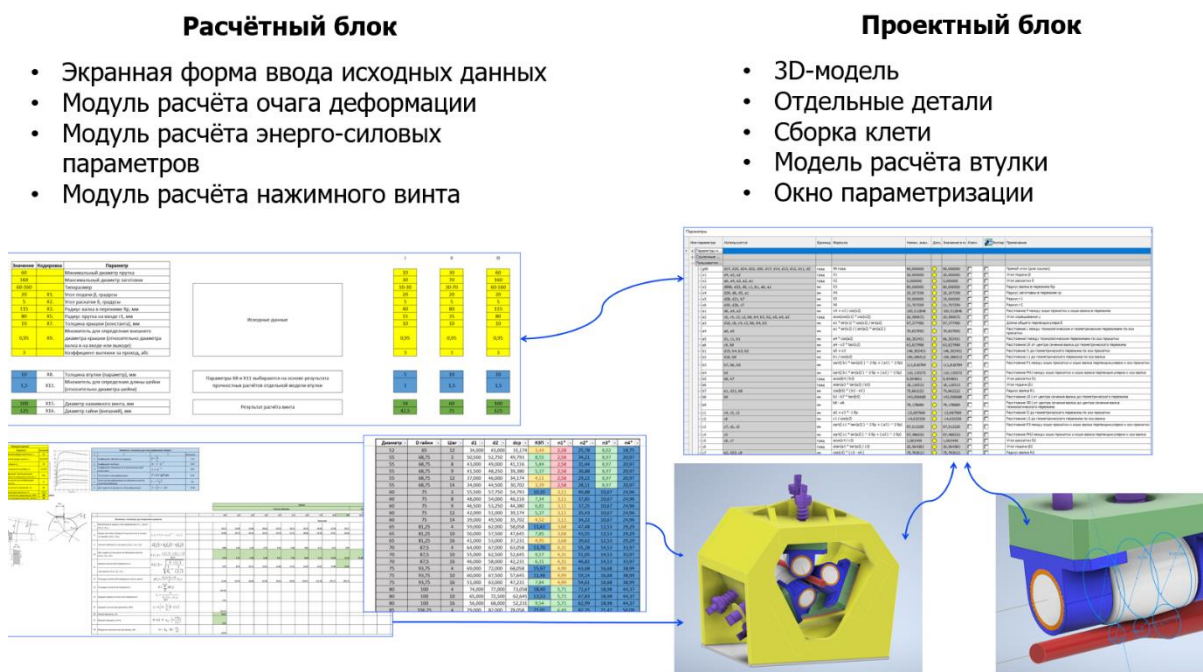


Рисунок 3.3 – Обобщенная схема архитектуры работы алгоритма

### 3.2.2 Формулировка общей концепции проектирования

Детализация этапа выбора исходных параметров для проектирования представлена на рисунке 3.4. На входе этапа представлены исходные параметры для проектирования, а на выходе этапа сформулирована общая концепция проектирования.

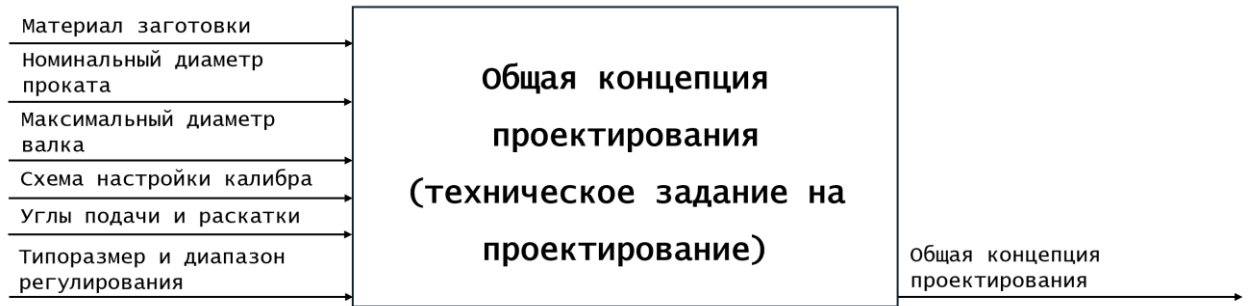


Рисунок 3.4 – Детализация этапа «Общая концепция проектирования (техническое задание на проектирование)».

Учитывая описанные в разделе 3.1 факторы и 3.2.1 подходы, требуется определить оптимальные исходные параметры для проектирования трёхвалковой клетки стана винтовой прокатки, включающие в себя схему положения валков, углы подачи и раскатки, основные типоразмеры проката, а также диапазон регулирования валков. Также следует заблаговременно выбрать тип привода и нажимного устройства проектируемой клетки, рассчитать ориентировочную производительность под выбранный сортамент.

В большинстве случаев производственного применения разработанного алгоритма данные параметры будут определяться на начальном этапе разработчиком оборудования.

Соответствие проектируемой клетки требованиям технических ограничений, таких как допустимая нагрузка и коэффициент запаса прочности, будет определен в результате проверочных прочностных расчётов построенной модели.

Для удобства ввода исходных данных в программную среду Autodesk Inventor был разработан программно-расчетный модуль (ПРМ) на базе MS Excel, на экранной форме которого можно указать исходные параметры проектирования для их автоматической интеграции и передачи в модель в Autodesk Inventor. Экранная форма Excel мастер-файла представлена на рисунке 3.5.

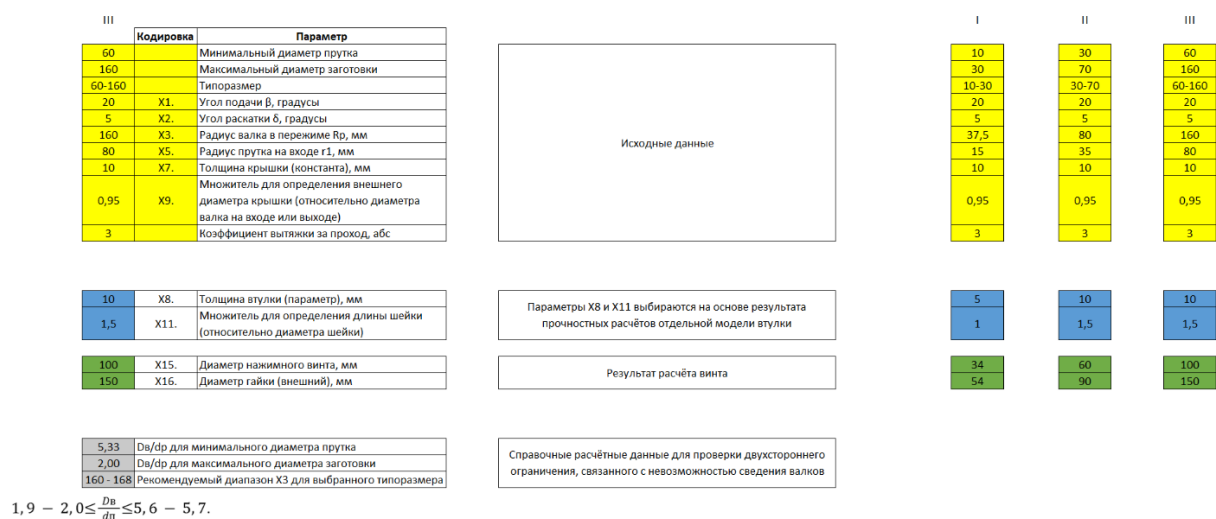


Рисунок 3.5 – Экранная форма Excel ПРМ, используемая для ввода исходных данных.

При детальном проектировании отдельных узлов общий перечень задействованных параметров значительно увеличивается и требует классифицирования для удобной работы с деревом проектирования. Все задействованные параметры кодифицируются латинской буквой и цифрой (по аналогии с параметрами, использованными для автоматизации методики виртуальных пережимов в разделе 2.4.3). Это позволяет в дальнейшем значительно облегчить процедуру расчёта в программной среде.

### 3.2.3 Определение пространственной компоновки валковой группы

Основной задачей данного этапа проектирования является построение адаптивной схемы взаимного положения осей валков и оси прокатки, которая в дальнейшем будет использоваться в качестве основы для получения геометрии следующих сопряженных узлов клетки. Схема является адаптивной, потому что изменяется в зависимости от определенных ранее исходных параметров. Детализация данного этапа проектирования представлена на рисунке 3.6.

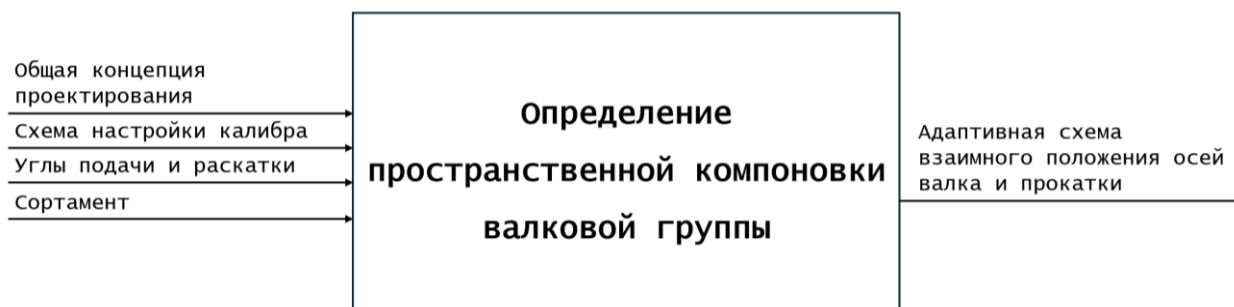


Рисунок 3.6 – Детализация этапа «Определение пространственной компоновки валковой группы».

Расчёт геометрии пространственного положения валков в алгоритме осуществляется в соответствии с описанной в разделе 2.4 методикой построения валкового узла – методикой виртуальных пережимов [73]. Использование описанной методики позволяет эффективно использовать метод параметризации при построении геометрии валковых узлов и очага деформации [74], особенно с учётом современных возможностей параметризации при использовании автоматизированного проектирования в CAD системе. Схема, используемая в методике, представлена на рисунке 3.7 (а, б).

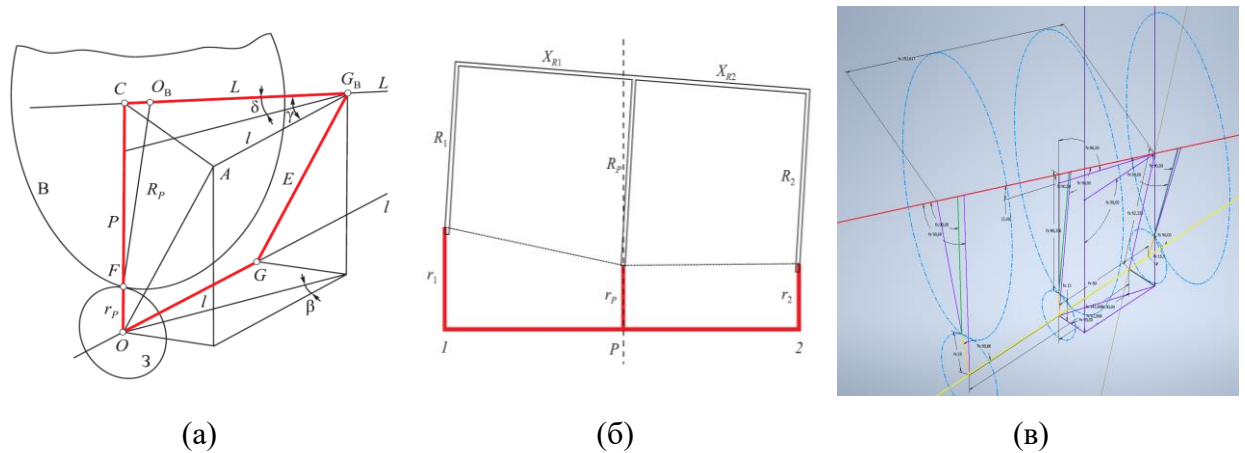


Рисунок 3.7 – Схема взаимного расположения осей валка CL и прокатки Ol (а); Обозначения геометрических размеров очага деформации и валка (б): красная толстая линия – очаг деформации, двойная – валок. 1,2 - сечения входа и выхода, соответственно, P – сечение технологического пережима; (в) пример адаптивной схемы взаимного положения осей валка и прокатки ( $\beta=20^\circ$ ,  $\delta=5^\circ$ ), красным выделена ось валка, жёлтым ось прокатки, зелёным сечения валка, оранжевым сечения прокатываемого прутка.

Более подробно все этапы построений были ранее описаны в работе [82]. Результат построений представлен на рисунке 3.7 (в). Полученная пространственная модель позволяет создавать геометрию очага деформации для различного сочетания углов подачи и раскатки. Далее, на основе схемы положения валков возможна разработка параметров валкового соединения (валок, подшипниковые опоры, подушки и кассета валка).

### 3.2.4 Определение и расчёт параметров валкового узла

Основной задачей данного этапа проектирования является получение трёхмерной параметрической модели валкового узла, используя полученную на прошлом этапе адаптивную схему взаимного положения осей валка и прокатки, а также схему положения

валков и выбранные подшипниковые опоры. Детализация данного этапа проектирования представлена на рисунке 3.8.

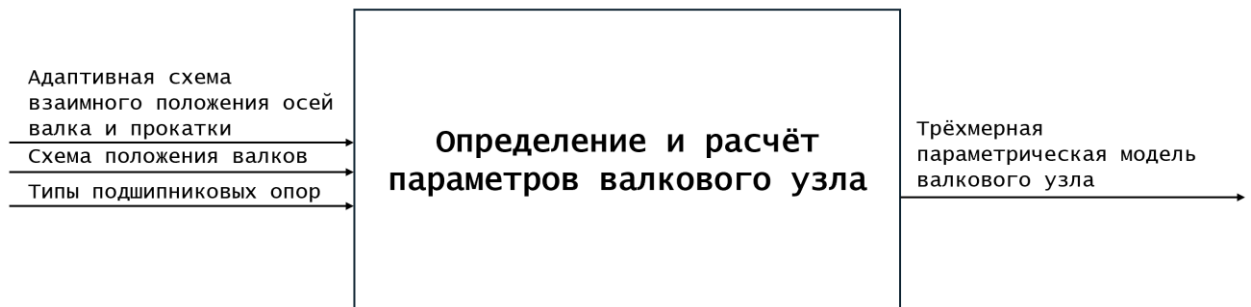


Рисунок 3.8 – Детализация этапа «Определение и расчёт параметров валкового узла».

Создание валковых узлов можно разделить на несколько подэтапов, в частности:

1. Выбор схемы положения и настройки валков.
2. Определение размеров входных и выходных опор, формирование подушек валков.
3. Выбор типа подшипниковых опор.
4. Формирование кассеты валка.

#### 3.2.4.1 Выбор схемы положения и настройки валков

По конструкции и устройству различают три основные разновидности мини-станов [35]:

- с осевой настройкой валков без конструктивного угла подачи, установленных под углом раскатки и с поперечным эксцентриситетом (станы 10–30 и 25–45) (рисунок 3.9 а);
- с радиальной настройкой валков (стан 14–40) (см. рисунок 3.9 б);
- с настройкой перемещением двух верхних валков к центру стационарного нижнего валка (станы 30–70, 40–120, 90–220) (см. рисунок 3.9 в).

Каждая из представленных схем имеет свои преимущества и недостатки. Станы, работающие по первой схеме, имеют более высокую жесткость за счет отсутствия механизма уравнивания, однако требуют сложного расчета калибровки валка для прокатки всего диапазона прокатываемых заготовок и необходимость синхронизации настройки калибра по плоскости пережима.

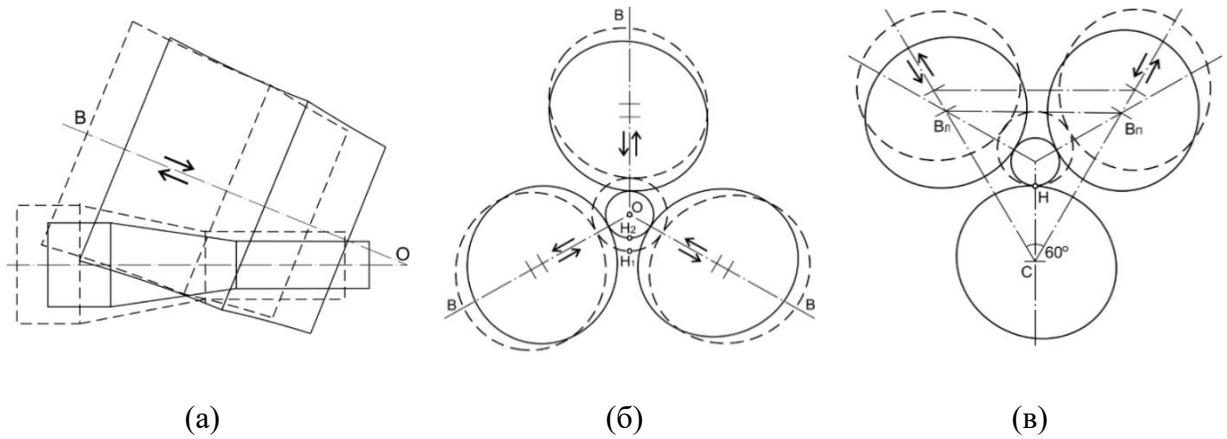


Рисунок 3.9 – Схемы настройки рабочих валков министанов винтовой прокатки: (а) – осевая схема настройки мини-станов серий «10-30» и «25-45» (Фронтальный вид с одним валком в двух положениях); (б) – радиальная (традиционно трубная) схема настройки мини-стана серии «14-40»; (в) – схема настройки перемещением двух верхних валков к центру стационарного нижнего валка министанов серий «30-70», «40-120» и «90-220»

Вторая схема предполагает одновременное или независимое (в зависимости от выбранной конструкции нажимного механизма) перемещение всех трех валков относительно оси прокатки, которая является постоянной. Это позволяет обеспечить точную настройку калибра, но предполагает три механизма для перемещения валков, что может снижать жесткость системы. К преимуществам данной схемы настройки также можно отнести постоянную ось прокатки, что дает возможность прокатки без необходимости перенастройки входной и выходной стороны.

В третьей схеме один валок является стационарным (чаще всего нижний), что облегчает его монтаж в клетки и не требует его перенастройки. Однако в данном случае возникает необходимость установки входной и выходной сторон на разную высоту для совпадения оси заготовки разного диаметра и оси прокатки. В случае небольшого диапазона прокатываемых диаметров это не является особой проблемой.

Для применения метода параметризации и создания адаптивной модели наиболее удобным является выбор схемы с одинаковыми элементами (принцип модульности и взаимозаменяемости, принцип наследственности), что позволит применить идентичные зависимости и взаимосвязи при перестроении модели. В связи с этим, в рамках данного исследования выбрана схема радиальной настройки валков. Кроме того, это позволит упростить конструкцию входной и выходной стороны и направляющих проводок.

### 3.2.4.2 Определение размеров входных и выходных опор, формирование подушек валков

Закодированные параметры группы E отвечают за определение в модели параметров шеек валка, втулок, подушек и кассеты. При этом, для корректного расчета геометрии вводятся дополнительные исходные параметры X7–X23. Данные параметры и разработанные аналитические зависимости представлены в таблице 3.1 и хранятся в сгруппированном виде в ПРМ на вкладке «Parameters».

Таблица 3.1 Таблица кодирования параметров для определения шеек валка, втулок, подушек и кассеты (на примере типоразмера 30-70).

Обознач.	Название параметра	Формула в Autodesk Inventor	Формула
<b>Дополнительные исходные параметры для определения шеек валка, втулок, подушек и кассеты</b>			
X7	Толщина подушки, мм	Явное значение (передается из ПРМ)	Явное значение (10*)
X8	Толщина втулки, мм	Явное значение из ПРМ (определено на основе расчета на прочность)	Явное значение (10*)
X9	Множитель для определения внешнего диаметра подушки (относительно диаметра валка на входе или выходе)	Явное значение (передается из ПРМ)	Явное значение (0,95*)
X11	Множитель для определения длины втулки (относительно диаметра шейки)	Явное значение из ПРМ (определено на основе расчета на прочность)	Явное значение (1,5*)
X13	Удлинение рабочей зоны валка, мм	$X13 = X3 * 0,25$	$X13 = X3 * 0,25$
X14	Толщина кассеты, мм	$X14 = X23 + (X23 * 0,8)$	$X14 = X23 + (X23 * 0,8)$
X20	Фаска площадки и подушек, мм	$X20 = X21/3$	$X20 = X21/3$
X21	Ширина плоского основания подушки с отверстиями для болтового крепления к кассете, мм	$X21 = E1$	$X21 = E1$
X22	Глубина болтового крепления подушки к кассете, мм	$X22 = (X3 * 0,3) + (X14 * 0,2)$	$X22 = (X3 * 0,3) + (X14 * 0,2)$
X23	Ход валка, мм	$X23 = \left(\frac{D_{з.макс.+10}}{2}\right) - \left(\frac{D_{пр.мин.}}{2}\right)$	$X23 = \left(\frac{D_{з.макс.+10}}{2}\right) - \left(\frac{D_{пр.мин.}}{2}\right)$
*пример выбранных значений параметров для типоразмера клетки 30–70			
<b>Параметры для определения шеек валка, втулок, подушек и кассеты</b>			
E1	Внешний радиус подушки со стороны входа, мм	$E1 = B7 * X9$	$E1 = B7 * X9$
E2	Внешний радиус подушки со стороны выхода, мм	$E2 = C7 * X9$	$E2 = C7 * X9$
E3	Внутренний радиус подушки и внешний радиус втулки со стороны входа, мм	$E3 = E1 - X7$	$E3 = E1 - X7$

E4	Внутренний радиус подушки и внешний радиус втулки со стороны выхода, мм	$E4 = E2 - X7$	$E4 = E2 - X7$
E5	Внутренний радиус втулки и радиус шейки со стороны входа, мм	$E5 = E3 - X8$	$E5 = E3 - X8$
E6	Внутренний радиус втулки и радиус шейки со стороны выхода, мм	$E6 = E4 - X8$	$E6 = E4 - X8$
E7	Длина шейки валка со стороны входа, мм	$E7 = E1 * X11$	$E7 = E1 * X11$
E8	Длина шейки валка со стороны выхода, мм	$E8 = E2 * X11$	$E8 = E2 * X11$

Для каждого параметра на рисунке 3.10 формируется зависимость относительно первоначальных диаметров торцов рабочей бочки валка, что позволяет оставаться в габаритных ограничениях при перестроениях модели.

Определение и расчёт радиусов шейки валка, подшипника и подушки (рисунок 3.10) начинается от внешних торцевых поверхностей бочки валка, так как их диаметры являются габаритным ограничением. Стоит обратить внимание, что длина шейки валка обоих концов должна быть увеличена на величину технологического отступа (5 мм). Технологический отступ позволяет избежать излишнего трения боковых поверхностей валка с подушками. Шейки валка строятся от торцов рабочей бочки валка, используя окружности радиусов E5/E6 и длины шеек E7/E8. С входной стороны шейки валка удлинены, на них имеются специальные участки с лысками для крепления универсальных шпинделей, на которые в финальном проверочном расчёте будет воздействовать крутящий момент. С точки зрения прочности валкового узла диаметр шеек валков должен быть как можно больше, однако необходимо учитывать величину нескольких переточек рабочей поверхности валка для увеличения срока его службы.

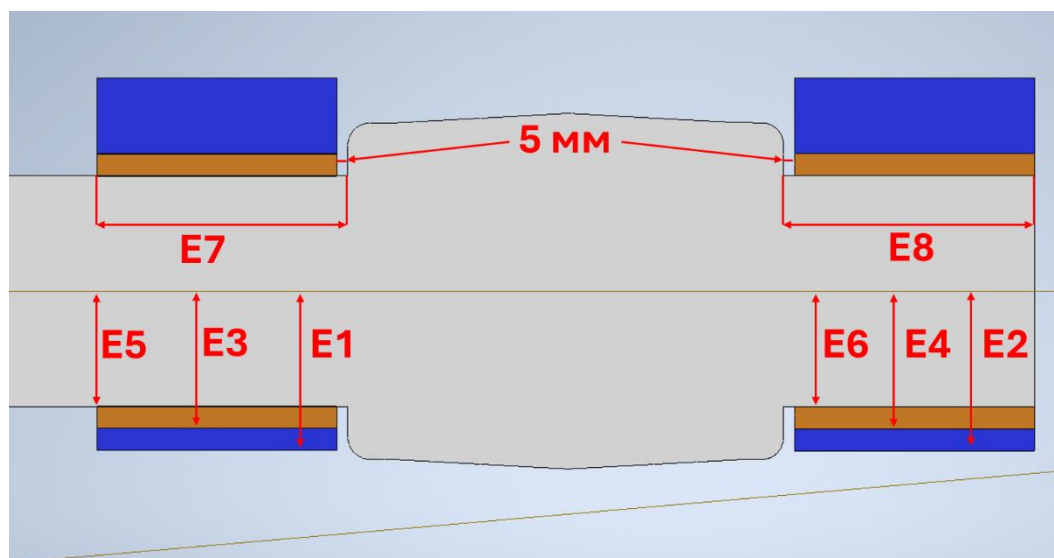


Рисунок 3.10 – Основные габаритные параметры валкового узла.

Основное назначение подушек рабочих валков – установка в них подшипников и валка, и его позиционирование в рабочей клетки. Кроме этого, в подушках прокатных станов обычно выполняются технологические отверстия (каналы) и вырезы для подачи смазки и установки уплотнительных манжет. Подушки валков должны обладать достаточным коэффициентом запаса прочности (3–5) при минимальных габаритах и массе, чтобы иметь возможность беспрепятственно свести валки на минимальный калибр.

Подушка представляет собой корпус с цилиндрическим вырезом под установку подшипника и имеет плоское основание с отверстиями для болтового крепления к кассете. Данное основание  $X_{21}$  равно внешнему диаметру подушки с входной стороны.

Основное усилие прокатки, передающееся на кассету, направлено в сторону основания подушек, поэтому с противоположной стороны подушка имеет более тонкую стенку корпуса и выполнено в форме полуокружности, что позволяет более компактно разместить подушки друг относительно друга.

Глубина болтового крепления подушки к кассете  $X_{22}$  высчитывается по формуле (3.3):

$$X_{22} = (X_3 * 0,3) + (X_{14} * 0,2) \quad (3.3)$$

Корректирующий коэффициент 0,3 от радиуса валка в пережиме и 0,2 от толщины кассеты позволяет адаптивно перестраивать глубину болтового крепления таким образом, что оно не будет превышать габаритов кассеты и позволит сохранить ей достаточную прочность. Диаметр болтового крепления по умолчанию 20 мм, с возможностью корректировки при необходимости.

Исходный параметр  $X_7$  используется для определения толщины подушек на валковом узле. Он подбирается исходя из требуемых габаритных размеров проектируемой клетки. При этом, важно учитывать, что с учётом того, что геометрия шейки валка строится от внутреннего диаметра подушки то, чем больше выбирается толщина стенки корпуса подушки, тем меньше в итоге будет диаметр шейки валка.

Исходный параметр  $X_9$  используется для определения внешнего диаметра подушки относительно диаметра валка на входном или выходном сечении. Связь этих двух параметров позволяет адаптивно перестраивать шейки, втулки и подушки относительно типоразмера проектируемого стана. При этом не рекомендуется выбирать данный множитель более единицы, потому что в таком случае есть риск контакта подушек на выходной стороне при максимальном сведении валков.

Также стоит упомянуть исходный параметр  $X_{13}$ , отвечающий за удлинение рабочей зоны валка. Он отвечает за дополнительное удлинение рабочей зоны валка с обеих сторон

и их последующего скругления. Скругление помогает избежать острых кромок, которые могут помешать прохождению прутка через рабочую зону или приводить к появлению дефектов на прокате в виде подрезов и винтового следа. Данный параметр связан корректирующим коэффициентом с радиусом вала в пережиме, что позволяет адаптировать удлинение рабочей зоны к типоразмеру проектируемого стана. Данный параметр высчитывается по формуле (3.4):

$$X_{13} = X_3 * 0,25. \quad (3.4)$$

#### 3.2.4.3 Выбор типа подшипниковых опор

Подшипниковые опоры рабочих валков обеспечивают свободное вращение вала и передают усилие прокатки от вала на подушки и далее на станину через кассеты. В прокатном производстве используются различные типы подшипников (качения, скольжения, полужидкостного или жидкостного трения) [83]. На министанах винтовой прокатки обычно используются подшипники скольжения в виде цилиндрических втулок, выполненных из антифрикционной бронзы. В первую очередь, это связано с ограничениями по габаритным размерам и невозможности установки на выходной стороне вала [84]. Кроме этого, подшипники скольжения дешевле и проще в изготовлении, просты конструктивно, удобнее в эксплуатации. Таким образом, для построения модели министана выбраны подшипниковые опоры в виде втулок скольжения. На данном этапе проектирования будет необходимо выполнить прочностной расчет данного элемента, что позволит найти требуемые минимальные габариты, которые будут отвечать заданному условию прочности при максимально допустимых нагрузках.

Исходные параметры  $X_8$  и  $X_{11}$ , используемые для определения толщины втулки и длины шейки (что также сказывается и на длине втулки) выбираются исходя из прочностного расчёта втулки, выполненного в отдельном файле детали. Прочностной расчет необходим для получения оптимального соотношения длины и толщины втулок, чтобы они могли выдерживать нагрузки при промышленной эксплуатации. Прочностной расчёт выполняется на основе параметризации для всех возможных комбинаций длин и толщин втулок в рамках выбранных диапазонов. Так, толщина втулки  $X_8$  может принимать значения от 5 до 25 мм с шагом 1 мм. При этом относительный коэффициент длины  $X_{11}$  определён в рамках диапазона 1,0–1,7 от внутреннего диаметра втулки. Таким образом, получается 168 возможных конфигураций, для которых выполняется расчёт. Программная среда Autodesk Inventor позволяет выполнить расчёт для полного набора конфигураций и далее выбрать оптимальные значения, заполнив их на экранной форме ПРМ excel. Выбор оптимальной конфигурации толщины и длины втулок представлен на рисунке 3.11.

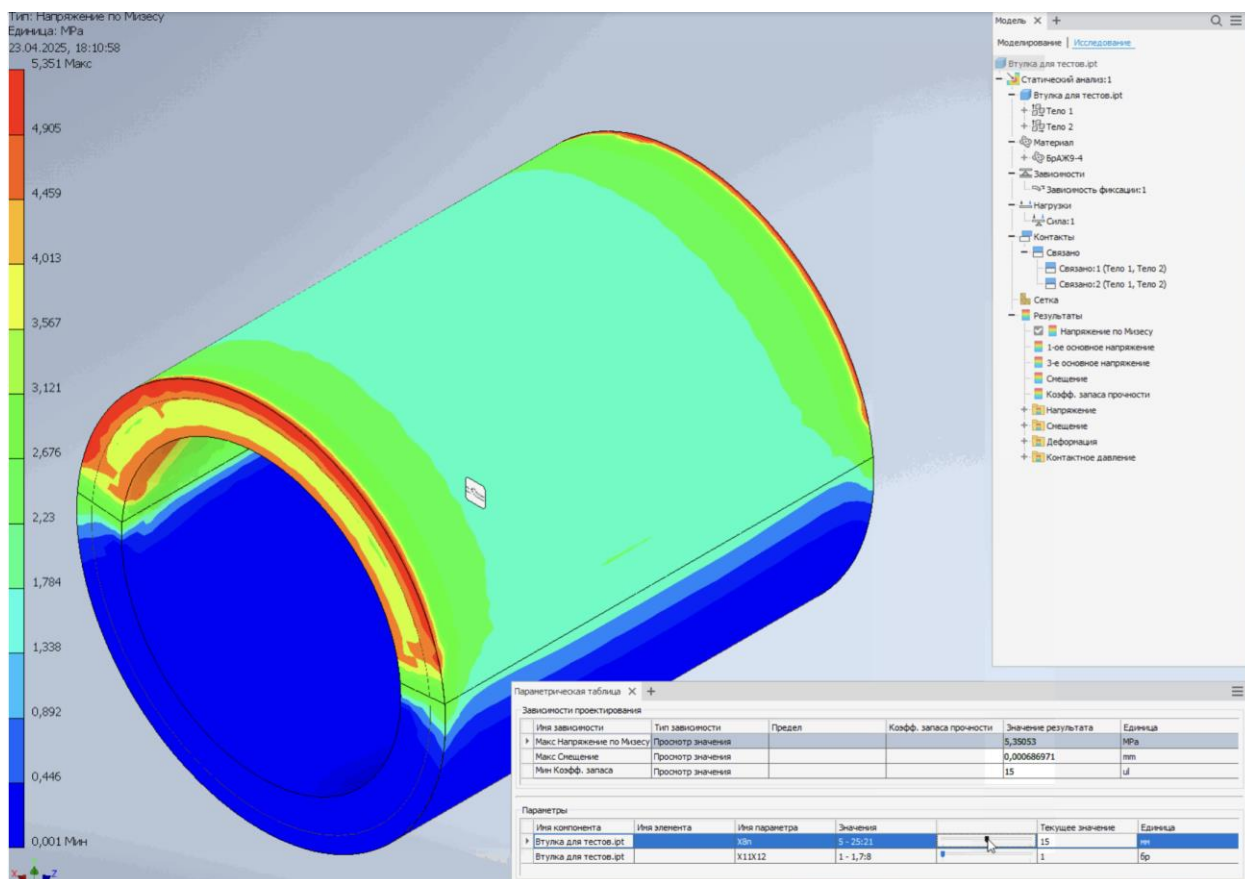
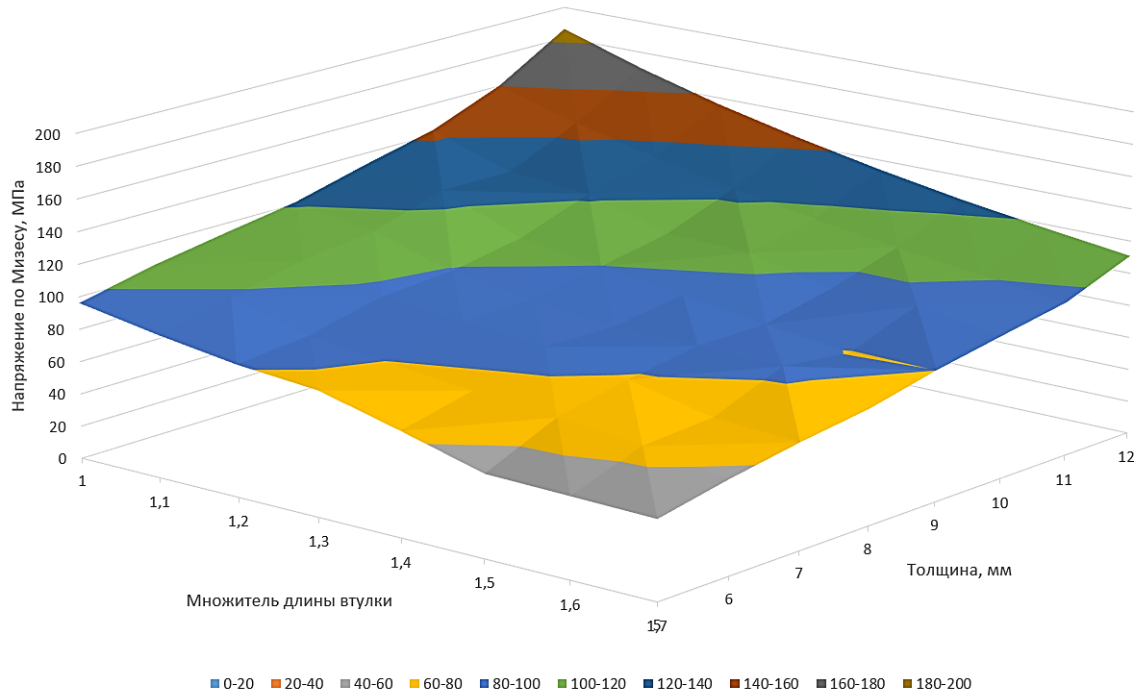
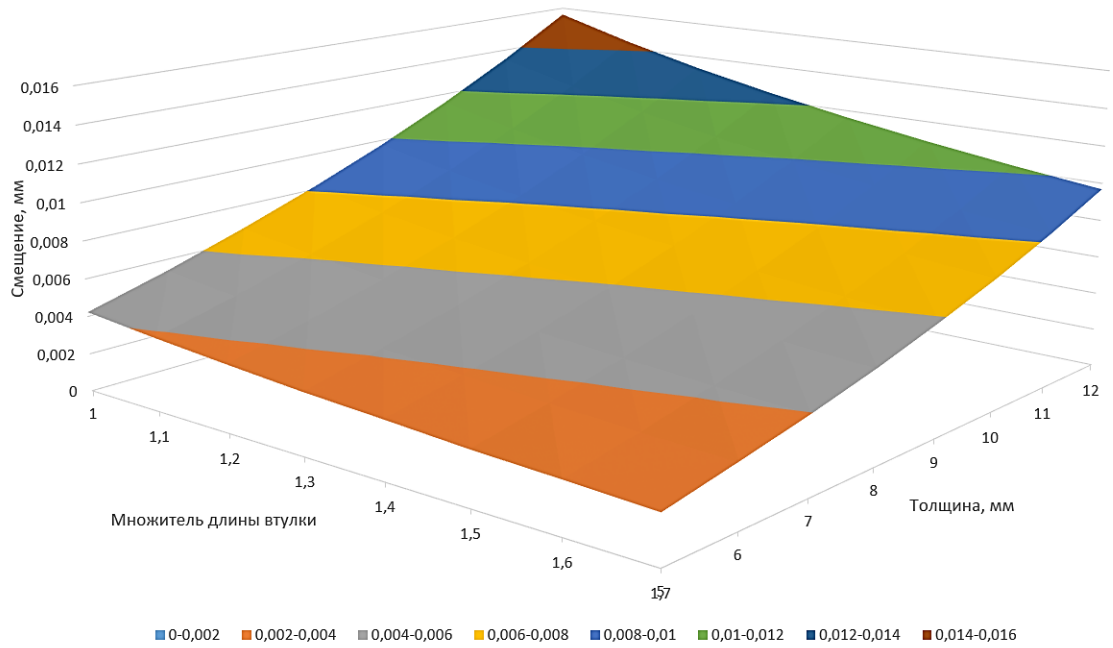


Рисунок 3.11 – Выбор рационального соотношения толщины и длины втулок.

В данном случае, имея ограничение наружного диаметра втулки, определяемого габаритом подушки, наблюдается зависимость влияния параметров толщины и длины втулки на её коэффициент запаса прочности под нагрузками. Для неё справедливо, что при увеличении толщины втулки уменьшается её внутренняя площадь поверхности, что при аналогичных нагрузках ведёт к увеличению напряжений и уменьшению коэффициента запаса прочности. При увеличении длины втулки, в свою очередь, напряжения уменьшаются, а коэффициент запаса прочности увеличивается, по той же самой причине изменения внутренней площади контактной поверхности. Описанные зависимости на примере втулки клетки малого типоразмера (10-30) представлены на рисунке 3.12.



(a)



(б)

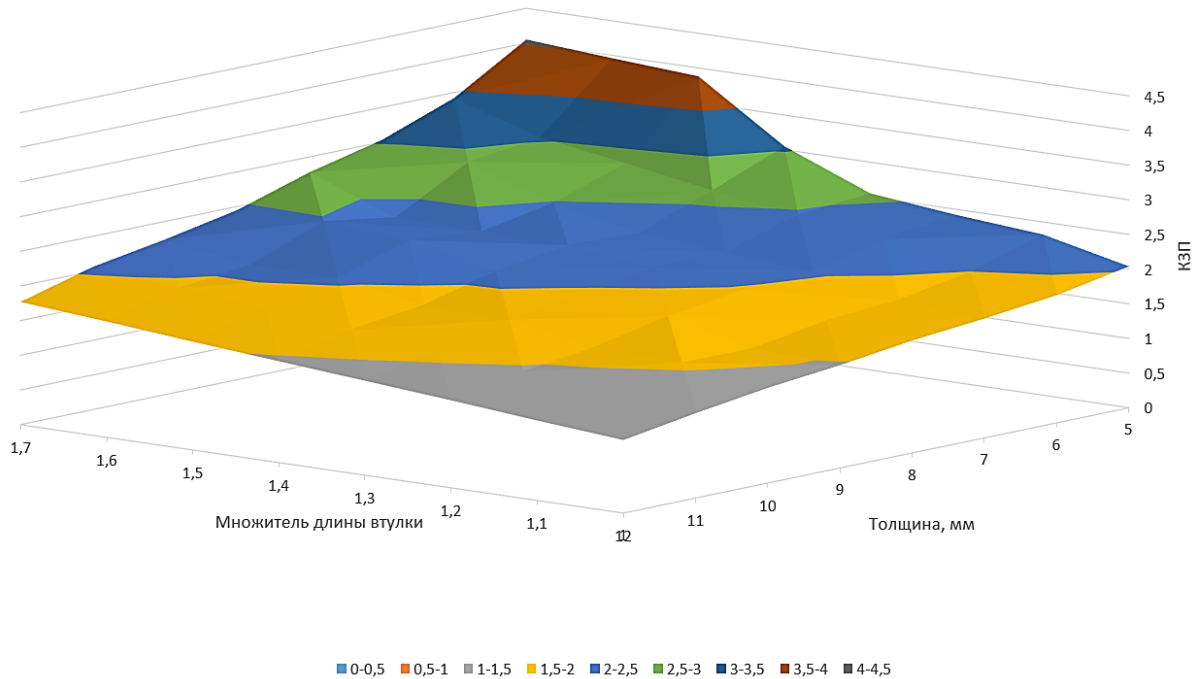


Рисунок 3.12 – Зависимость прочностных характеристик втулки от её толщины и длины: (а) – напряжение по Мизесу, (б) – смещение, (в) – коэффициент запаса прочности (КЗП).

При этом, для реализации описанного проверочного расчёта требуется получить усилие прокатки. Усилие прокатки X17 рассчитывается автоматически в ПРМ на отдельной вкладке «Энергосиловые параметры» по методике [85-88], используя исходные параметры X, а также добавленное справочное значение сопротивления деформации металла заготовки для заданного температурно-деформационного режима. Далее, полученное значение усилия автоматически передаётся в сборку клетки (для финального проверочного расчёта – раздел 4.1) и файл втулки. Пример автоматического расчёта усилия с учётом поциклового развития на обжимном и калибровочном участке [89, 90] представлены на рисунке 3.13.

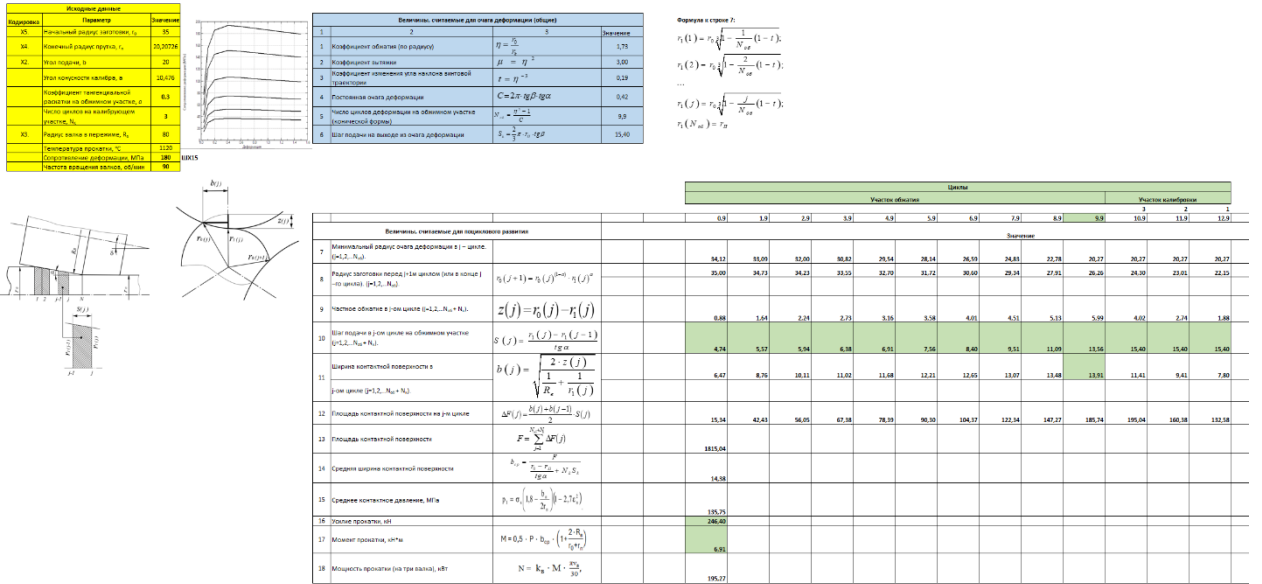


Рисунок 3.13 – Пример автоматического расчёта энергосиловых параметров с учётом поциклового развития на обжимном и калибровочном участке.

Расчёт энергосиловых параметров осуществляется автоматически на основе заранее добавленных формул во всех ячейках листа. Количество рассчитанных циклов на обжимном участке адаптивно меняется в зависимости от угла конусности калибра  $\alpha$  и коэффициента вытяжки  $\mu$ , который в свою очередь определяется начальным радиусом заготовки и конечным радиусом прутка. Радиус заготовки автоматически передаётся в расчёт из экранной формы с основными исходными данными. Конечный радиус заготовки автоматически определяется в соответствии с коэффициентом вытяжки за проход, который также передаётся в расчёт из экранной формы. Расчет проводится для варианта прокатки с максимальным обжатием (коэффициент вытяжки 3). Стоит отметить, что такие высокие обжатия за проход практически никогда не применяются в практике производства на министанах, поэтому в данном случае это обеспечивает дополнительный коэффициент запаса прочности для рассматриваемой модели. В конкретном случае технического задания максимальный коэффициент вытяжки за проход может быть скорректирован в зависимости от материала и других требований к продукции и процессу производства.

Количество циклов на калибрующем участке задано равным трем исходя из минимально необходимого требования полного оборота прутка на длине калибрующего участка и получения круглого профиля проката. Оно может быть изменено в зависимости от исходных данных и выбранной системы калибровки. Радиальное усилие на валок, момент прокатки и мощность автоматически пересчитываются в зависимости от полученного количества циклов обжимного и калибровочного участка очага деформации, определяющих суммарную площадь контактной поверхности.

#### 3.2.4.4 Формирование кассеты валка

Тело кассеты валка, к которой будут крепиться подушки, формируется на плоскости параллельной плоскости оси прокатываемого прутка. Одна поверхность параллельна основаниям подушек и сопрягается с ними, а вторая поверхность имеет угол наклона, равный углу раскатки (рисунок 3.14 б). Это дает возможность упростить конструкцию подушек и технологию изготовления всего валкового узла, так как основание подушек имеет одинаковые поверхности, плоскость которых параллельна оси валка. Толщина кассеты валка при этом определяется условием прочности и максимальным ходом валков для заданного максимального и минимального калибра.

Эскиз кассеты валка представляет собой призму с прямоугольным основанием и строится с помощью проецирования оснований подушек на вспомогательную плоскость и достраивания их проекций до прямоугольника. Толщина кассеты адаптивно изменяется в соответствии с выбранным типоразмером. Она связана корректирующим коэффициентом с рассчитанным ходом валка, который в свою очередь определяется через максимальный диаметр заготовки и минимальный диаметр прутка. Толщина кассеты X14 определяется по формуле (3.5):

$$X14 = X23 + (X23 * 0,8), \quad (3.5)$$

где коэффициент 0,8 обеспечивает надежное позиционирование кассеты в корпусе станины при крайних положениях.

Ход валка X23, используемый для вычисления толщины кассеты, определяется по формуле (3.6). В формуле предусмотрен небольшой технологический зазор, позволяющий развести валки сверх максимального диаметра предполагаемого проката для возможности беспрепятственной транспортировки заготовки без обжатия при аварийных ситуациях.

$$X23 = \left( \frac{Dз. макс. + 10}{2} \right) - \left( \frac{Dпр. мин.}{2} \right), \quad (3.6)$$

где Dз.макс. – максимальный диаметр заготовки (мм); Dпр.мин. – минимальный диаметр прутка (мм).

Далее, полученную кассету валка достраивают до трапеции с фасками по четырём углам её верхней плоскости для удобства монтажа в корпусе станины. Фаска X20 меняется в зависимости от габаритных размеров кассеты по формуле (3.7) и позволяет облегчить сборку всей конструкции. Её размер определяется как 1/3 от ширины плоского основания с отверстиями для болтового крепления кассеты.

$$X20 = X21/3. \quad (3.7)$$

На рисунке 3.14 (а) представлен изометрический вид полученного валкового узла.

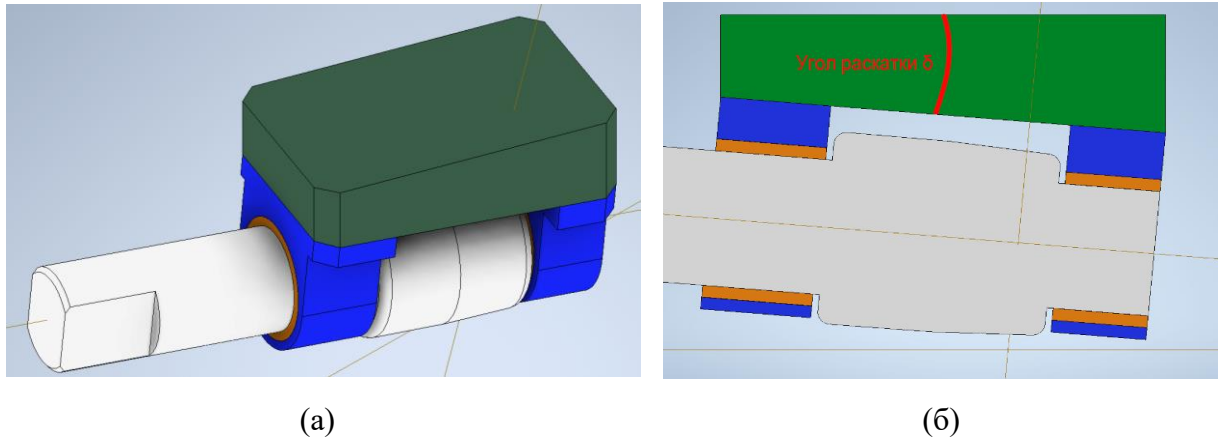
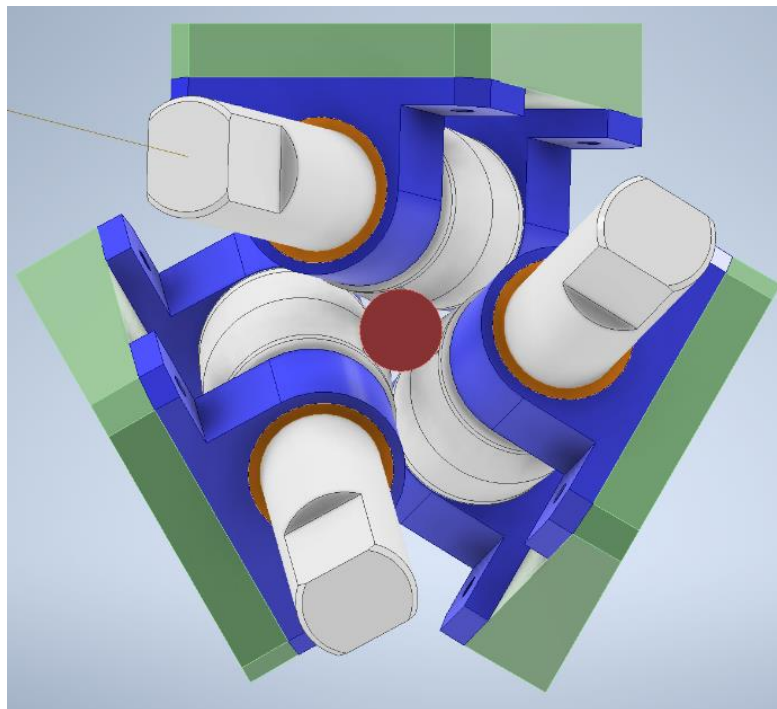
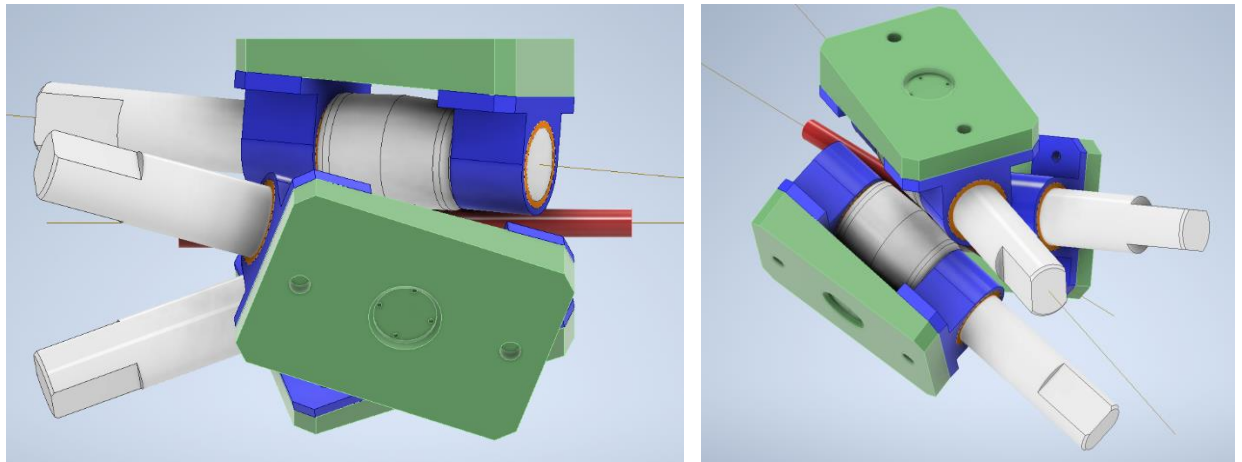


Рисунок 3.14 – Вид полученного валкового узла: (а) – изометрический вид;  
(б) – продольный разрез.

Полученный валковый узел используется для построения геометрии параметрической модели валкового соединения, представленного на рисунке 3.15. Два других валковых узла добавляются в модель при помощи кругового массива элементов путем вращения вокруг оси прокатки с равным шагом  $120^\circ$ . Таким образом, при изменении каких-либо параметров валкового узла или изменения положения, вся система будет меняться автоматически по выбранной радиальной схеме настройки.



(а)



(б)

(в)

Рисунок 3.15 – Вид полученного валкового соединения: (а) – вид спереди; (б) – вид сбоку; (в) – изометрический вид.

### 3.2.5 Определение и расчёт параметров нажимного устройства

Основной задачей данного этапа проектирования является получение трёхмерной параметрической модели валкового соединения с нажимным устройством, используя полученную на прошлом этапе параметрическую модель валкового узла. Детализация данного этапа проектирования представлена на рисунке 3.16.

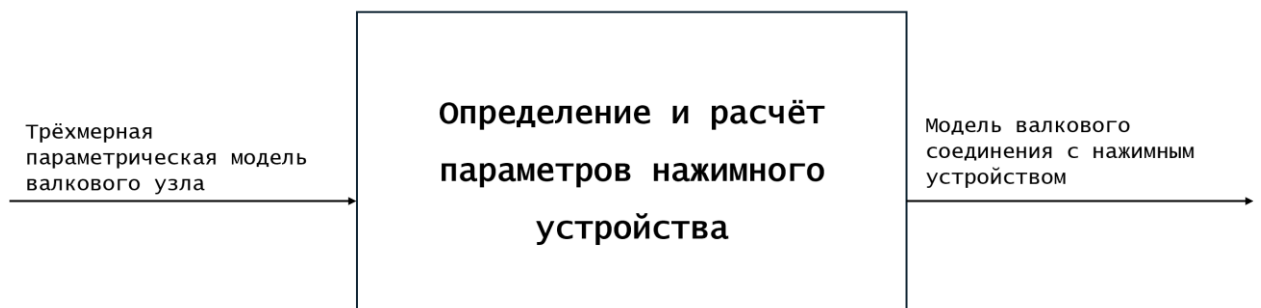


Рисунок 3.16 – Детализация этапа «Определение и расчёт параметров нажимного устройства».

Нажимное устройство предназначено для изменения положения валка и установки необходимого размера калибра. В прокатном оборудовании распространены механические (пара винт-гайка, клиновое) и гидравлические нажимные механизмы [91]. Гидравлические нажимные устройства (ГНУ) обладают наибольшей точностью позиционирования и обеспечивают жесткость системы калибров, поэтому нашли широкое применение в многовалковых листовых станах холодной прокатки [92]. При этом ее работа обеспечивается достаточно сложной системой гидравлики. Клиновые нажимные

механизмы используют в том числе на станах винтовой прокатки [93-97]. Однако опыт их эксплуатации показывает, что они не лишены недостатков. Для обеспечения нормальной работы требуется высокая точность изготовления клиновых поверхностей и мощный привод для преобразования вращательного движения вала в поступательное движение клиньев. В данном случае для проектирования клетки выбрано механическое нажимное устройство, состоящее из нажимного винта и гайки. Нажимной винт, соединенный с гайкой по упорной резьбе, воспринимает усилие прокатки через подпятник и кассету вала.

Диаметр нажимного винта и гайки подбирается в соответствии с методикой расчёта коэффициента запаса прочности для нажимного винта и гайки в зависимости от материала, усилия прокатки и других параметров. Расчёт коэффициента запаса прочности для нажимного винта и гайки производится автоматически на отдельной вкладке ПРМ excel файла по всем возможным вариантам упорной резьбы в соответствии с ГОСТ 10177-82 [98]. Пример выбора диаметра винта и гайки по достаточному коэффициенту запаса прочности представлен на рисунке 3.17.

Диаметр	D гайки	Шаг	d1	d2	dcp	кзп	n1*	n2*	n3*	n4*
60	90	3	55,500	57,750	54,793	7,57	2,27	29,89	7,80	18,25
60	90	8	48,000	54,000	46,116	5,36	2,27	27,67	7,80	18,25
60	90	9	46,500	53,250	44,380	4,98	2,27	27,23	7,80	18,25
60	90	12	42,000	51,000	39,174	3,93	2,27	25,91	7,80	18,25
60	90	14	39,000	49,500	35,702	3,31	2,27	25,02	7,80	18,25
65	97,5	4	59,000	62,000	58,058	8,49	2,69	34,71	9,16	21,41
65	97,5	10	50,000	57,500	47,645	5,74	2,69	31,84	9,16	21,41
65	97,5	16	41,000	53,000	37,231	3,62	2,69	28,97	9,16	21,41
70	105	4	64,000	67,000	63,058	10,02	3,15	40,42	10,62	24,84
70	105	10	55,000	62,500	52,645	7,00	3,15	37,32	10,62	24,84
70	105	16	46,000	58,000	42,231	4,62	3,15	34,23	10,62	24,84
75	112,5	4	69,000	72,000	68,058	11,67	3,65	46,56	12,19	28,51
75	112,5	10	60,000	67,500	57,645	8,38	3,65	43,24	12,19	28,51
75	112,5	16	51,000	63,000	47,231	5,73	3,65	39,93	12,19	28,51
80	120	4	74,000	77,000	73,058	13,46	4,18	53,13	13,87	32,44
80	120	10	65,000	72,500	62,645	9,89	4,18	49,59	13,87	32,44
80	120	16	56,000	68,000	52,231	6,98	4,18	46,06	13,87	32,44
85	127,5	4	79,000	82,000	78,058	15,36	4,74	60,14	15,66	36,62
85	127,5	5	77,500	81,250	76,322	14,68	4,74	59,51	15,66	36,62
85	127,5	12	67,000	76,000	64,174	10,40	4,74	55,13	15,66	36,62

n1 - Коэффициент запаса прочности гайки для поверхности соприкосновения гайки с поперечной станиной  
n2 - Коэффициент запаса прочности гайки для резьбы гайки по напряжениям смятия  
n3 - Коэффициент запаса прочности гайки для резьбы гайки по напряжениям изгиба  
n4 - Коэффициент запаса прочности гайки для резьбы гайки по напряжениям среза

кзп  
0-3 Низкий  
3-5 Предельно допустимый  
5-10 Достаточный  
>10 Высокий

Рисунок 3.17 – Расчетные таблицы для выбора диаметра винта и гайки по достаточному коэффициенту запаса прочности.

При этом выбор осуществляется по пяти коэффициентам (один для винта и четыре для гайки):

- $n_0$  – коэффициент запаса прочности для винта;
- $n_1$  – коэффициент запаса прочности гайки для поверхности соприкосновения гайки с поперечной станиной;
- $n_2$  – коэффициент запаса прочности гайки для резьбы гайки по напряжениям смятия;
- $n_3$  – коэффициент запаса прочности гайки для резьбы гайки по напряжениям изгиба;
- $n_4$  – коэффициент запаса прочности гайки для резьбы гайки по напряжениям среза.

Также стоит отметить, что наружный диаметр гайки X16 в разработанном алгоритме связан с диаметром нажимного винта X15 формулой (3.8). Таким образом, выбор диаметра

нажимного винта определяет и внешние габариты гайки, что позволяет адаптивно менять размеры всего узла нажимного устройства и определять их габариты.

$$X_{16} = X_{15} * 1,5. \quad (3.8)$$

Нажимной винт строится от плоскости кассеты валка, учитывая, что его торцевая плоскость основания всегда совпадает с верхней плоскостью кассеты. Нижняя часть нажимного винта имеет вогнутую форму, чтобы обеспечить наибольшую площадь касания с подпятником и меньший диаметр, чтобы при воздействии усилия проката центрироваться на подпятнике. Подпятник с выпуклой рабочей поверхностью имеет фланец, с помощью которого он крепится винтами в вырезе внутри верхней части кассеты валка. Подпятник расположен по центру кассеты, и его центр совпадает с осью пережима валка, что обеспечивает равномерную передачу усилия от валка на нажимной винт и далее на станину. От центра кассеты с помощью эскизов формируются винт, гайка и корпус для монтажа гайки в поперечинах станины. Толщина корпуса для гайки (рисунок 3.18) определяется по формуле (3.9):

$$s_{к.г.} = X_{16} + 15. \quad (3.9)$$

С помощью неё, болтов и крышки (толщиной, определяемой типоразмером и результатами прочностного расчёта) гайка будет закреплена в корпусе станины (рисунок 3.19). Монтаж гайки в корпусе осуществляется с внешней стороны станины клетки, что упрощает ее замену при необходимости полного разбора валковых узлов. Во внутренней части станины при этом предусмотрена опорная кольцевая поверхность под гайку (толщиной, определяемой типоразмером и результатами прочностного расчёта), которая фиксирует ее в корпусе. Между нажимным винтом и станиной предусмотрен технологический зазор, предотвращающий трение между винтом и станиной в моменты сведения-разведения валков.

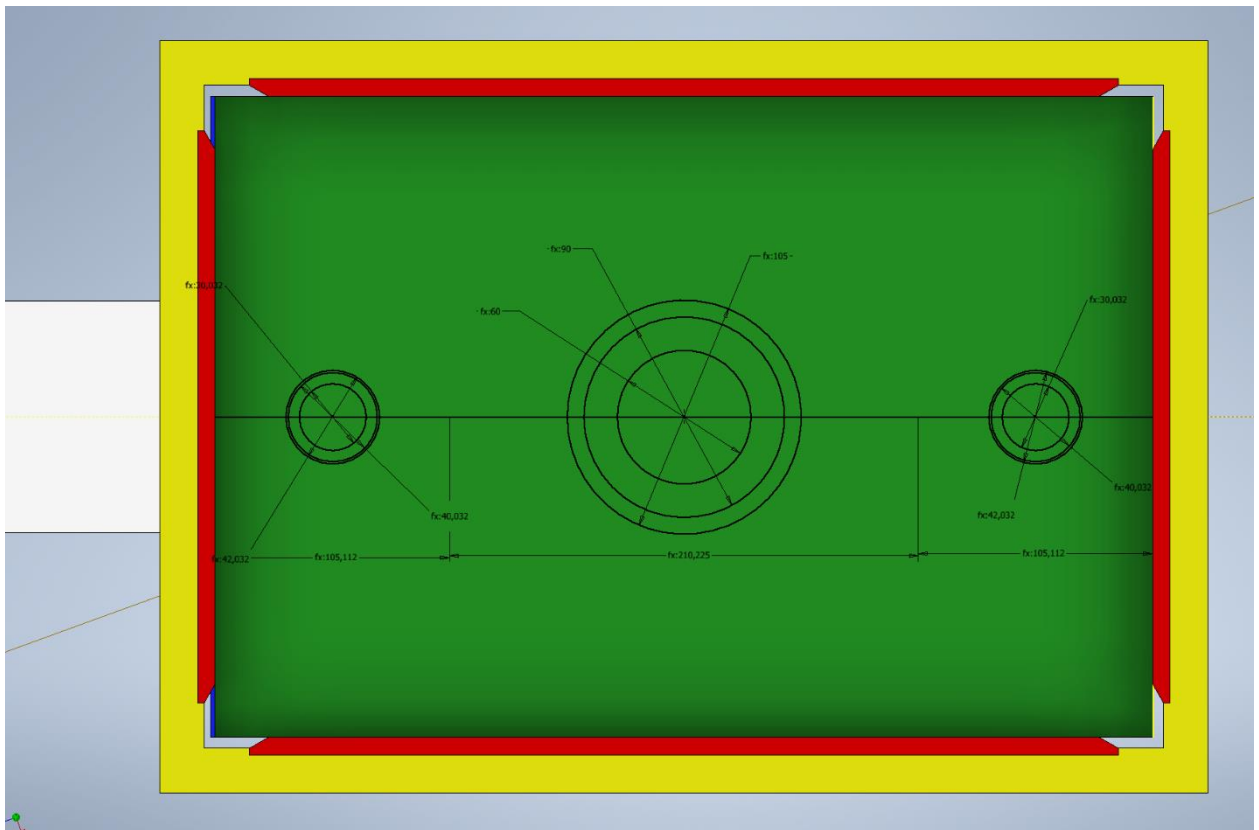


Рисунок 3.18 – Эскиз, используемый при параметризации и построении нажимного устройства и тяг уравнивания валкового узла.

На внешней рабочей поверхности нажимного винта имеется упорная резьба, а в верхней части – шлицевое или шпоночное соединение, с помощью которого винт будет крепиться к приводу. Гайка в виде втулки с внутренней упорной резьбой устанавливается в каркас станины и фиксируется от поворота благодаря плоским фланцам на наружной поверхности. Основные габаритные размеры нажимного устройства выбираются исходя из минимального требуемого запаса прочности, а также рабочего хода, который определяется с учетом минимального и максимального диаметра проката. Остальные размеры устанавливаются с помощью пропорциональных зависимостей.

Для уравнивания валков с подушками применяют различные уравнивающие устройства, которые можно поделить на грузовые, гидравлические и пружинные [8]. Грузовое уравнивание используется при перемещении валка на большую высоту (до 2000 мм). Ему свойственна простота и надёжность в эксплуатации. Однако, инерция контргрузов большой массы может вызывать динамические нагрузки в системе, а также, большие рычаги с контргрузами требуют углубления и усложнения фундамента под рабочей клетью. Помимо этого, оно ограничивает перемещение валка, делает его зависимым от нажимного механизма. Как правило, грузовые уравнивающие устройства неприменимы для станов винтовой прокатки. Гидравлическое

уравновешивание не обладает недостатками, свойственными грузовому уравновешиванию, работает бесшумно и без толчков, имеет небольшие габариты. Однако, для питания цилиндров уравновешивания необходима установка насосно-аккумуляторной станции. В случае, если перемещение валков и масса уравновешиваемых деталей невелики, применяют более простое пружинное устройство для уравновешивания валка.

В данном случае, с учётом особенностей конструкции министанов, выбрано пружинное уравновешивание валков, состоящее из двух тяг, соединенных с кассетой. На верхней грани кассеты валка по обе стороны от углубления для подпятника располагаются отверстия с резьбой для крепления тяг. Отверстия позиционируются по центру на проекциях подушек на плоскость кассеты валка. При этом отверстия для тяг располагаются в центрах крайних четвертей кассеты. Диаметр резьбы на концах тяг ( $D_{p.m.}$ ) определён по формуле (3.10):

$$D_{p.t.} = \frac{l_k}{14}, \quad (3.10)$$

где  $l_k$  – длина кассеты, мм.

Такое отношение позволяет соблюдать габаритные размеры для наиболее распространённых типоразмеров клеток и обеспечивает достаточное расстояние между корпусом гайки и тягами для удобства эксплуатации клетки. Максимальный диаметр тяг  $D_t$  (рисунок 3.18) определяется по формуле (3.11):

$$D_t = D_{p.t.} + 10. \quad (3.11)$$

При этом, между тягами и станиной предусмотрен технологический зазор (2...5 мм) определяемый типоразмером, предотвращающий трение между тягами и станиной в моменты перемещения винта и свободной сборки уравновешивающего устройства. Тяги проходят через поперечину станины, где с внешней стороны на них установлены пружины. Подтягивание кассеты валка и всех сопряжённых с ней элементов обеспечивается с помощью двух пружин сжатия. Геометрия пружин сжатия, шайб и гаек для фиксации пружин определяется автоматически во вкладке ПРМ на основе габаритных параметров тяг и стандартных размеров в соответствии с ГОСТ.

Общий вид описанной выше конструкции валкового узла, нажимного и уравновешивающего устройств представлен на рисунке 3.19. Габаритные размеры, межосевые расстояния и др. параметры модели заданы в программе в формульном виде и определяются исходя из размеров модели, созданной на предыдущих этапах.

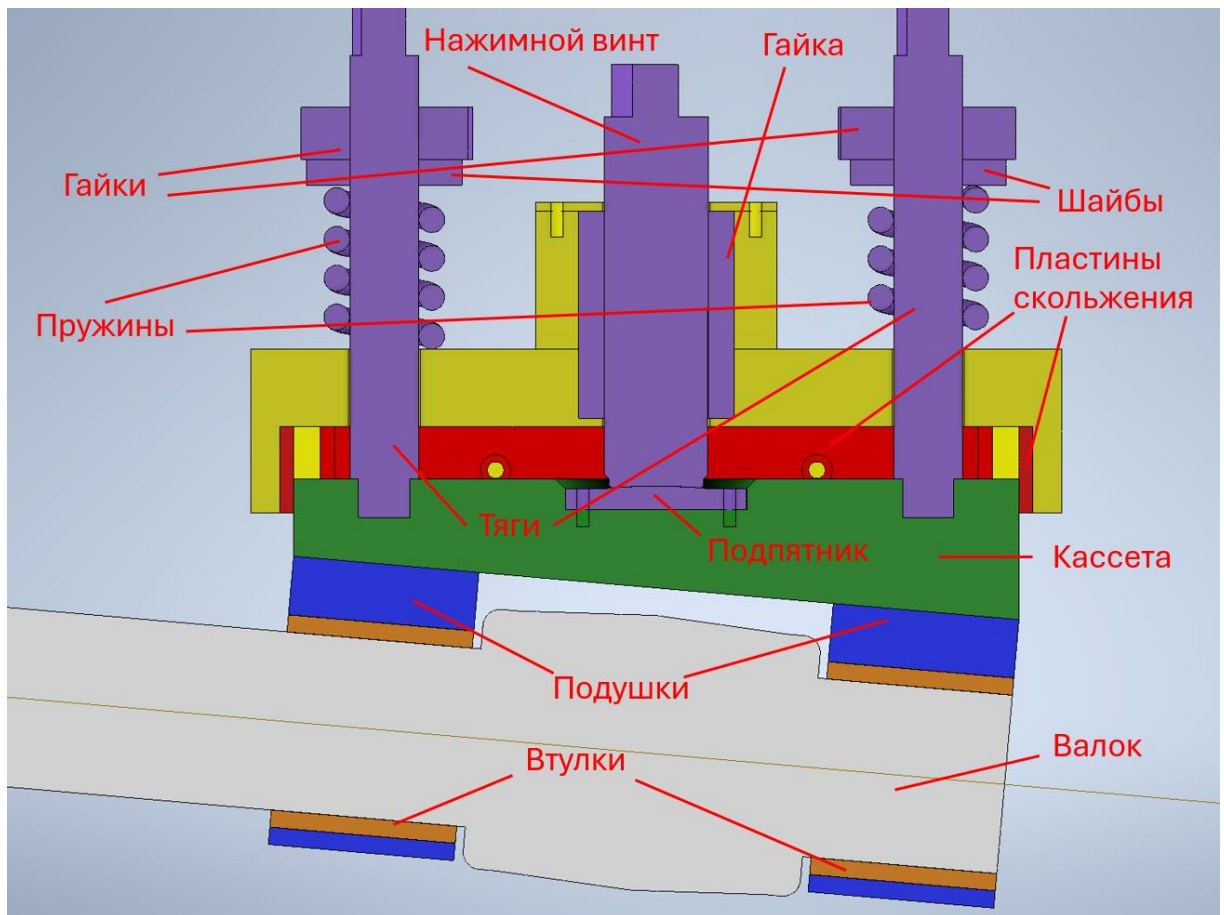


Рисунок 3.19 – Продольное сечение валкового соединения с нажимным устройством.

### 3.2.6 Определение и расчёт станины

Основной задачей данного этапа проектирования является получение трёхмерной параметрической модели станины, используя полученную на прошлом этапе параметрическую модель валкового соединения с основными механизмами. Детализация данного этапа проектирования представлена на рисунке 3.20.

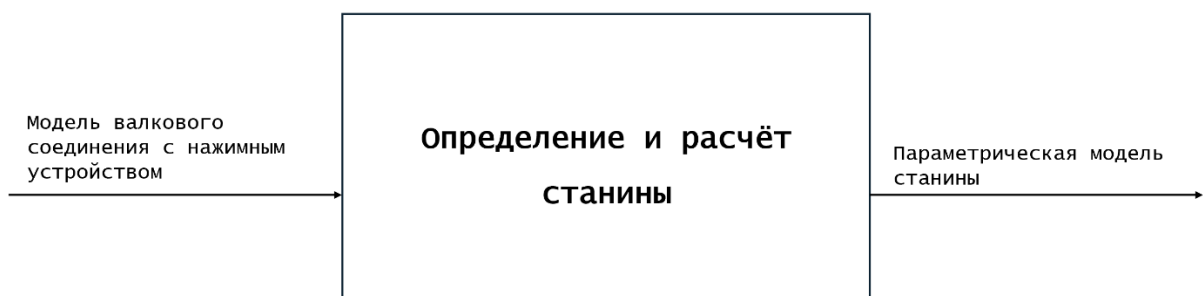


Рисунок 3.20 – Детализация этапа «Определение и расчёт станины».

Станина рабочей клетки прокатного стана является основным конструктивным элементом, воспринимающим усилие прокатки. В корпусе станины обычно смонтированы все основные узлы и детали и вспомогательные системы (смазки, охлаждения и др.) [99]. Станины зачастую являются наиболее сложным и дорогостоящим элементом с точки зрения изготовления. К ней предъявляются повышенные требования по прочности, долговечности, удобству монтажа. Станины могут быть открытого и закрытого типа, изготовленные литьем или сварной из нескольких частей [8].

Для министанов винтовой прокатки, имеющих сложную пространственную конфигурацию валков, станина должна иметь достаточно простую форму, которая позволит обеспечить удобную эксплуатацию, доступ ко всем необходимым узлам, и при этом иметь необходимую прочность. С точки зрения создания универсальной конструкции и адаптивной модели, станина должна иметь как можно более простую геометрию деталей, минимум дополнительных вырезов и сложных элементов. В данном случае станина имеет коробчатую форму, состоящую из прямоугольного основания, двух вертикальных стенок с окнами для возможности установки всех узлов, и трех поперечных листов с вырезами для монтажа кассет с валками (рисунок 3.22). Дополнительно для повышения прочности станины на поперечинах добавлены ребра жесткости.

Каждая из трех поперечных листов имеет основание прямоугольной формы, на котором достраивается корпус ящичной формы с прямоугольным вырезом для установки в него кассеты. Продольная ось данного корпуса развернута на угол подачи, что позволяет сразу устанавливать валки в станине на требуемый угол (рисунок 3.21). На верхней части станины смонтированы шесть ребер, добавляющих ей дополнительную прочность.

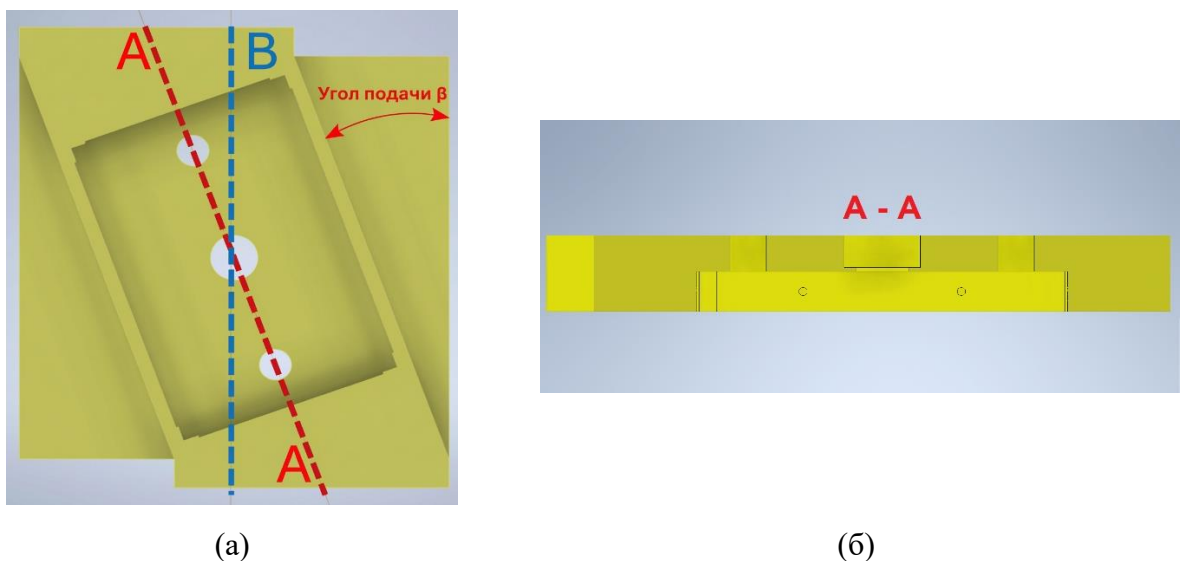


Рисунок 3.21 – Поперечный лист станины с основанием прямоугольной формы: (а) – вид снизу; (б) – сечение А – А; В – ось прокатки.

По внутренним боковым поверхностям корпуса кассет смонтированы пластины из антифрикционного бронзового сплава, что обеспечивает плавный ход кассеты с валком при перемещении. С внешней стороны поперечин имеется цилиндрический корпус для установки в нем нажимной гайки, а также предусмотрено два отверстия под тяги. Основные габаритные размеры станины определены рабочим ходом валков, габаритами рабочего валка, длиной подшипниковых опор и, соответственно, длиной кассеты.

Полученная модель станины может перестраиваться исходя из заданных параметров, а толщина боковых стенок и поперечных листов может уточняться в процессе проектирования на основе результатов прочностного расчета модели. В текущем варианте адаптивной параметризации толщина боковых стенок станины  $X30$  определяется формулой (3.12):

$$X30 = D_{\text{пр.мин.}} + 10, \quad (3.12)$$

где  $D_{\text{пр.мин.}}$  – минимальный диаметр прутка (мм).

Зависимость от минимального диаметра прутка позволяет адаптировать толщины боковых стенок станины к выбранному типоразмеру стана с сохранением достаточных прочностных характеристик. На рисунке 3.22 представлен общий вид полученной станины.

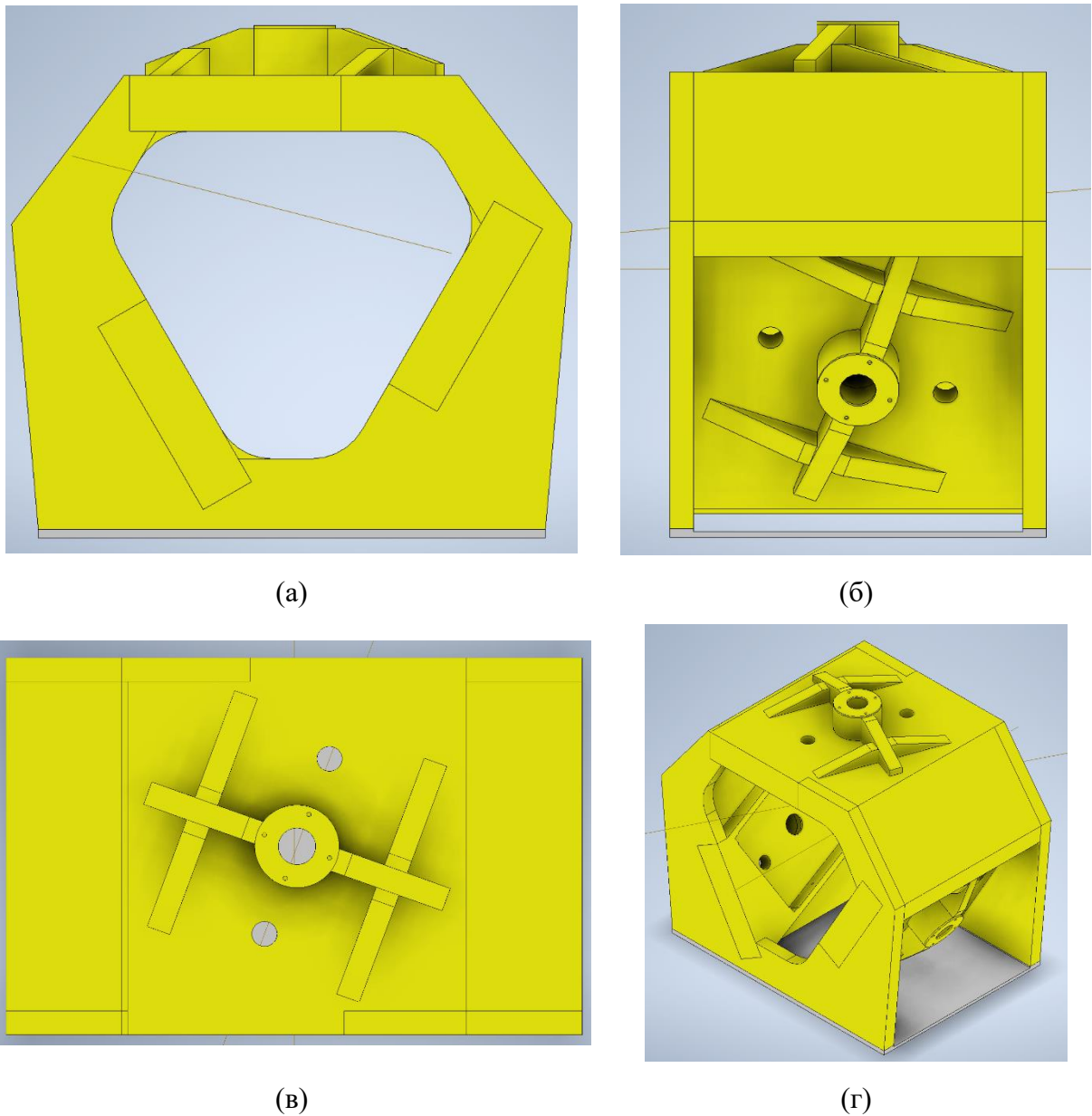


Рисунок 3.22 – Общий вид полученной станины: (а) – вид спереди (входная сторона); (б) – вид сбоку; (в) – вид сверху; (г) – изометрия.

### 3.2.7 Построение общей модели рабочей клетки и её параметризация

Основной задачей данного этапа проектирования является получение трёхмерной параметрической модели трёхвалковой клетки винтовой прокатки, используя полученную на прошлом этапе параметрическую модель станины и модель валкового соединения с нажимным устройством. Детализация данного этапа проектирования представлена на рисунке 3.23.

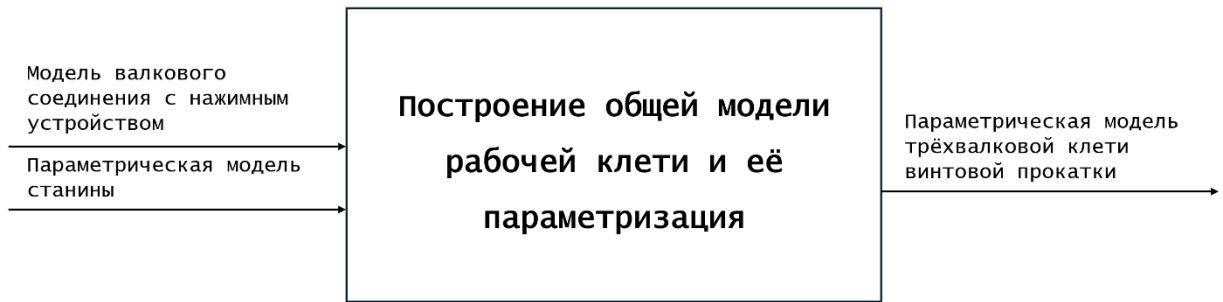
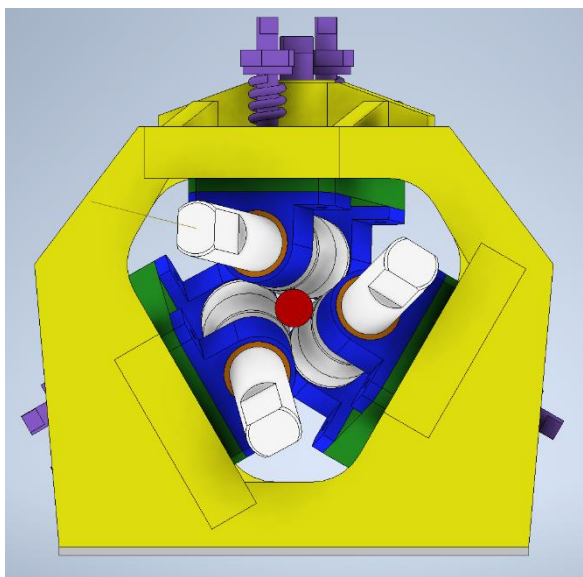
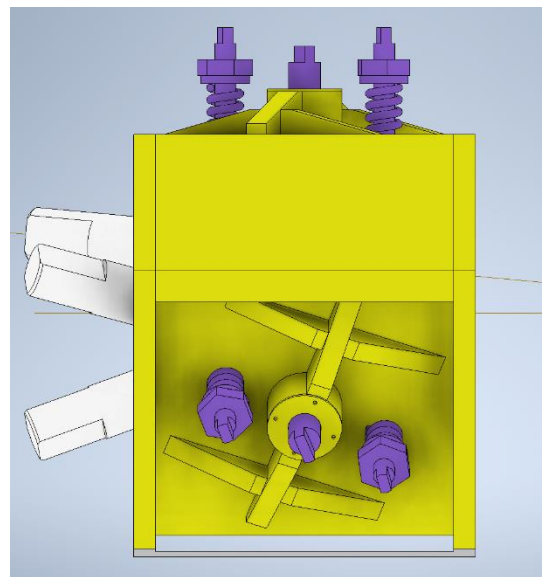


Рисунок 3.23 – Детализация этапа «Построение общей модели рабочей клетки и её параметризация».

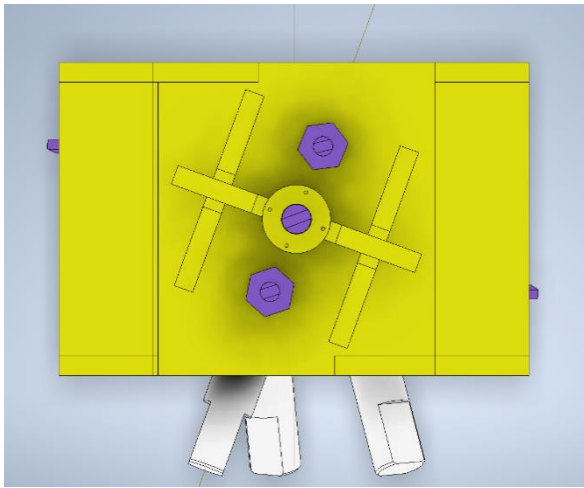
Результатом выполнения первых шести этапов описанного алгоритма является общая сборочная модель рабочей клетки винтовой прокатки (рисунок 3.24). В следующих этапах (раздел 4.1), на основе полученной сборки проводятся прочностные исследования модели. С помощью метода конечных элементов модель исследуется на возможность воспринимать максимальные расчетные нагрузки (усилие и момент прокатки), определяется распределение коэффициента запаса прочности для всех деталей в контексте сборки клетки, а также возможные деформации под нагрузкой. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации зависимостей в параметрической модели, устранения ошибок проектирования, выбора рациональных соотношений между размерами и сопряжениями, материалов для деталей и корректировки геометрии с учетом напряженно-деформированного состояния.



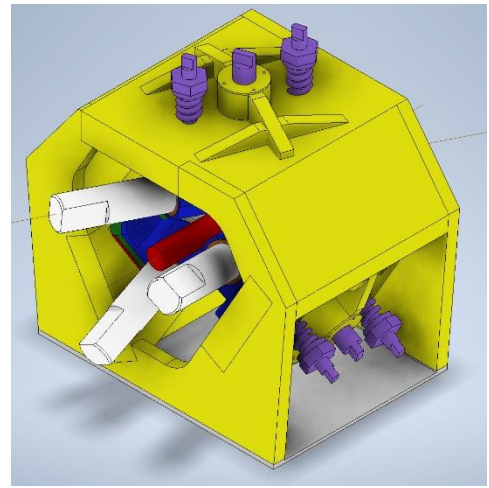
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3.24 – Общий вид модели рабочей клетки: (а) – вид спереди (входная сторона); (б) – вид сбоку; (в) – вид сверху; (г) – изометрия.

На рисунке 3.25 представлен продольный разрез конструкции валкового узла в сборке с клетью.

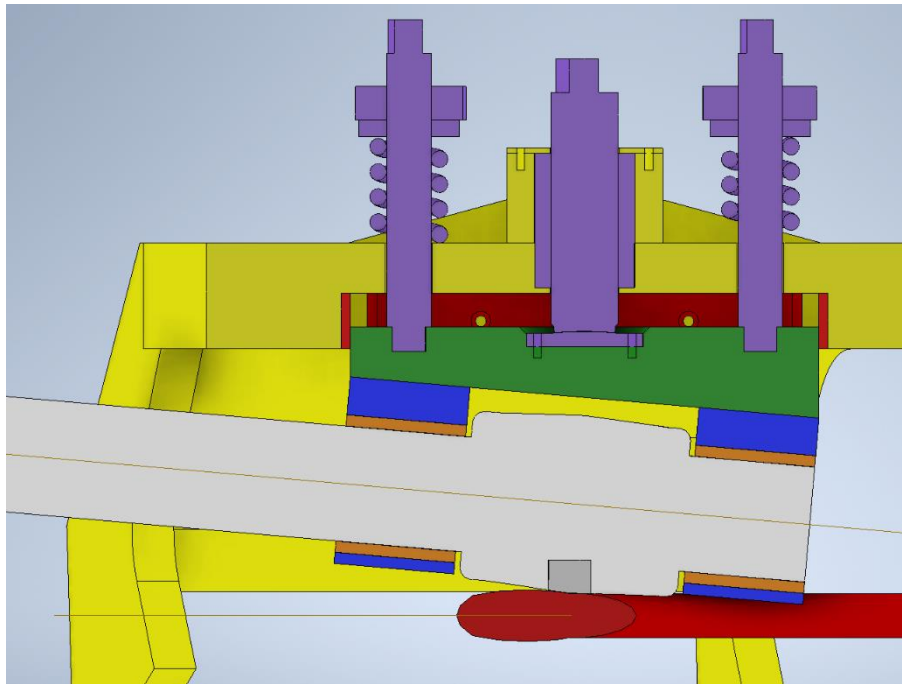


Рисунок 3.25 – Продольный разрез конструкции валкового узла.

Основные массогабаритные и энергетические параметры спроектированных по разработанному алгоритму трёхвалковых клеток сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 Основные массогабаритные и энергетические параметры спроектированных по разработанному алгоритму трёхвалковых клетей.

<b>Типоразмер</b>	<b>Диаметр валка (D<sub>в</sub>), мм</b>	<b>Масса валка (M<sub>в</sub>), кг</b>	<b>Масса валковой группы (M<sub>в.г.</sub>), кг</b>	<b>Масса клетки (M<sub>к</sub>), кг</b>	<b>M<sub>в</sub>/M<sub>к</sub></b>	<b>Ширина клетки (B), мм</b>	<b>Длина клетки (L), мм</b>	<b>Высота клетки (H), мм</b>	<b>Суммарная мощность прокатки (N), кВт</b>
10-30	75	4,5	12,5	183	0,02	500	310	510	28
30-70	160	63,7	149,1	1374	0,05	960	640	950	195
60-160	230	174,0	428,4	4703	0,05	1470	880	1350	770

### 3.4 Выводы по главе 3

В данной главе представлено пошаговое описание реализации алгоритма автоматизированного проектирования трёхвалковых клеток винтовой прокатки, рассмотрены факторы, влияющие на допущения при проектировании и выбор основных механизмов. Разработанный алгоритм состоит из нескольких последовательно выполняемых этапов. Данные, полученные на каждом из этапов алгоритма, далее используются в последующих этапах. Основные выводы следующие:

1. Представлен алгоритм пошагового создания адаптивной трёхмерной рабочей клетки стана винтовой прокатки, основанный на параметрах очага деформации, являющегося базовым конструктивным элементом.

2. Определены исходные параметры для проектирования, в частности максимальный диаметр валка, минимальный диаметр проката и суммарный коэффициент вытяжки для одного комплекта валков. Также рассмотрены основные факторы, влияющие на конструкцию прокатной клетки и выбор основных узлов.

3. Создана трехмерная модель рабочей клетки, параметризация которой основана на иерархических зависимостях разного уровня, определяющими в которых являются первичные исходные параметры рабочего валка и заготовки.

4. Полученная трехмерная модель клетки позволяет использовать ее для оперативной разработки на стадии эскизного проектирования под требования технического задания и реализации концепции унификации конструкции для различных типоразмеров.

## ГЛАВА 4. ПРОВЕРОЧНЫЕ РАСЧЁТЫ ПОЛУЧЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

### 4.1 Проверочные расчёты для валидации построенной модели

Основной задачей данного этапа проектирования является выполнение проверочных расчётов, с помощью которых следует установить, насколько хорошо разработанная модель выдерживает рабочие нагрузки. Расчет производится для самого «тяжелого режима», т.е. варианта с максимальным обжатием, заготовки максимального диаметра и для материала, имеющего максимальное сопротивление деформации. В случае, если модель не выдерживает максимальных расчетных рабочих нагрузок, с учётом применения принципа итерационности, алгоритм предполагает возврат на один из предыдущих этапов, для выполнения корректировок. Детализация данного этапа проектирования представлена на рисунке 4.1.

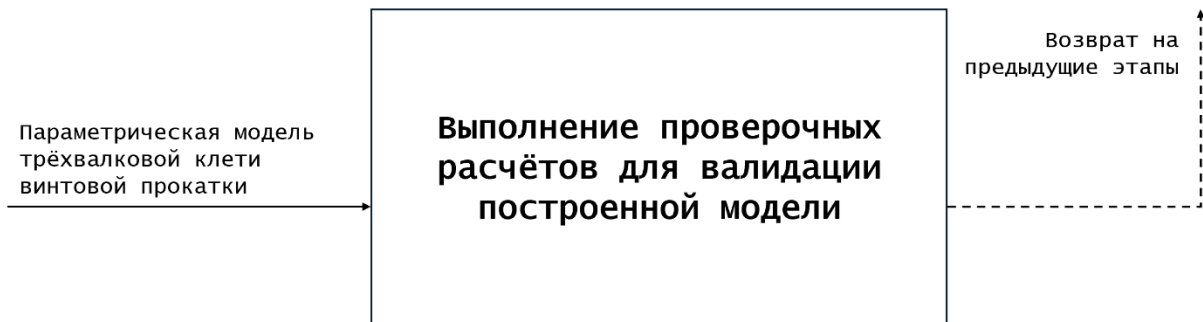


Рисунок 4.1 – Детализация этапа «Выполнение проверочных расчётов для валидации построенной модели».

#### 4.1.1 Расчёт нагрузок и ограничений

Для валидации полученных по разработанному алгоритму моделей следует предварительно рассчитать нагрузки и ограничения. Установка корректных параметров статического расчёта в Autodesk Inventor является необходимым условием, для получения верных значений напряжений, деформации и коэффициента запаса прочности.

Для расчёта напряжения в программной среде Autodesk Inventor используется метод конечных элементов, с помощью которых твердое тело разбивается на отдельные участки (сетка), для каждого узла которых выполняется расчёт уравнений на основе теории прочности. После этого система с помощью аппроксимации генерирует эпюры распределения полученных значений по твёрдому телу, с помощью которых инженер может оценить, какие участки твёрдого тела выдерживают рабочие нагрузки, а какие нет.

В рамках данного исследования валидация полученных моделей осуществлялась на основе приложения нагрузок двух видов: радиального усилия на валок и крутящего момента. Оба значения автоматически передаются в модель из соответствующей вкладки ПРМ excel файла, где они рассчитались на основании значений параметров, заполненных в соответствующих формах исходных данных.

Усилие прокатки X17 рассчитывается (идентично усилию, рассчитанному в пункте 3.2.4.3 для проверочного расчёта втулки) по следующей формуле [85-88] (4.1):

$$P_{\text{пр.}} = p * F, \quad (4.1)$$

где  $p$  – среднее контактное давление (МПа);

$F$  – площадь контактной поверхности ( $\text{мм}^2$ ).

При этом для получения корректных результатов расчёта следует приложить рассчитанное усилие к участку валка, соответствующего площади контактной поверхности с прокатываемым прутком. Данный участок (с учетом некоторого допустимого упрощения) представляет собой два полуэллипса с центрами в точке пересечения оси прутка и технологического пережима валка. Расчёт площадей данных полуэллипсов осуществляется автоматически по известной геометрической формуле (4.2):

$$S = \pi * a * b, \quad (4.2)$$

где  $a$  – длина большой полуоси эллипса (мм);

$b$  – длина малой полуоси эллипса (мм).

Малая полуось обоих полуэллипсов в данном расчёте представляет собой максимальную ширину контактной поверхности X24, поделенную пополам. Данное значение автоматически рассчитывается на соответствующем листе excel мастер-файла и автоматически передаётся в модель для построения нужного участка геометрии.

Большая полуось в данном случае является длиной контактной поверхности участка обжатия X27 и длиной контактной поверхности участка калибровки X28. Чертёж контактной поверхности прутка и валка изображён на рисунке 4.2(а). Полученная контактная поверхность на сплошном теле валка изображена на рисунке 4.2(б). Идентичные участки контактной поверхности строятся на трех валковых узлах. К каждому из участков прикладывается рассчитанное усилие прокатки.

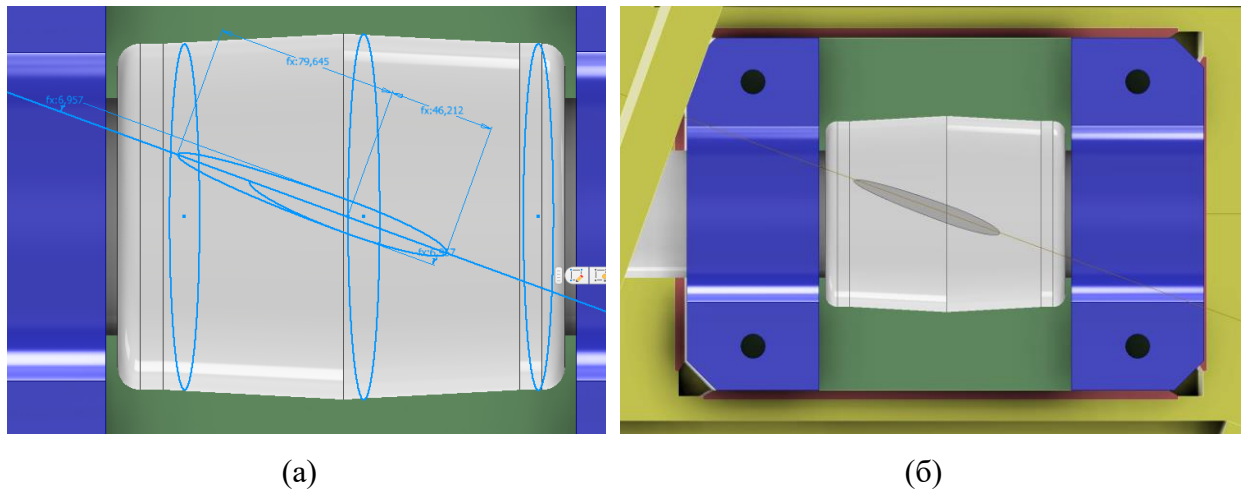


Рисунок 4.2 – Пятно контакта на валке для проверочного расчёта клетки: (а) – эскиз контактной поверхности прутка и валка; (б) – контактная поверхность на сплошном теле валка.

Крутящий момент для проверочного расчёта X29 автоматически рассчитывается на соответствующем листе excel мастер-файла по формуле [100] (4.3) и передаётся в модель. Крутящий момент в расчёте приложен к усеченным участкам выходного вала с входной стороны.

$$M = 0,5 * P_{пр.} * b_{ср.} * \left(1 + \frac{2 * R_B}{r_0 + r_n}\right), \quad (4.3)$$

где  $P_{пр.}$  – усилие прокатки (кН),

$b_{ср.}$  – средняя ширина контактной поверхности (мм),

$R_B$  – радиус валка в пережиме (мм),

$r_0$  – начальный радиус заготовки (мм)

$r_n$  – конечный радиус прутка (мм).

Проверяемая модель сборки закреплена в месте своего крепления к фундаменту, на прямоугольном основании, к которому привариваются боковые стенки станины.

На отдельной вкладке ПРМ были собраны наиболее распространённые материалы, используемые при изготовлении трёхвалковых клетей, приведены их основные механические и теплофизические свойства (рисунок 4.3). Собранные данные автоматически интегрируются в базу данных программной среды Autodesk Inventor для проведения проверочных расчётов.

Материал	Теплопроводность	Удельная теплоемкость	Коэффициент теплового расширения	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Модуль сдвига	Плотность	Предел текучести	Предел прочности растяжения
БрАЖ9-4	5,800E+01 Вт/(м*К)	0,423 Дж/(г*°С)	16,200 мкм/(м*°С)	111 ГПа	0,35	40000 МПа	7,500 г/см³	196 МПа	650 МПа
Сталь 09Г2С	1,600E+01 Вт/(м*К)	0,500 Дж/(г*°С)	11,400 мкм/(м*°С)	200 ГПа	0,29	75000 МПа	7,800 г/см³	295 МПа	517 МПа
Сталь 20	8,600E+01 Вт/(м*К)	0,461 Дж/(г*°С)	11,100 мкм/(м*°С)	205 ГПа	0,29	79000 МПа	7,830 г/см³	250 МПа	430 МПа
Сталь 3	8,800E+01 Вт/(м*К)	0,461 Дж/(г*°С)	11,600 мкм/(м*°С)	205 ГПа	0,29	79000 МПа	7,850 г/см³	225 МПа	440 МПа
Сталь 40Х	4,100E+01 Вт/(м*К)	0,466 Дж/(г*°С)	11,800 мкм/(м*°С)	214 ГПа	0,26	85000 МПа	7,850 г/см³	780 МПа	980 МПа
Сталь 40ХН	4,400E+01 Вт/(м*К)	0,466 Дж/(г*°С)	11,800 мкм/(м*°С)	200 ГПа	0,29	81000 МПа	7,820 г/см³	785 МПа	980 МПа
Сталь 45	4,800E+01 Вт/(м*К)	0,473 Дж/(г*°С)	11,900 мкм/(м*°С)	204 ГПа	0,30	78000 МПа	7,826 г/см³	830 МПа	980 МПа
Сталь 50ХФА	4,000E+01 Вт/(м*К)	0,490 Дж/(г*°С)	11,700 мкм/(м*°С)	218 ГПа	0,28	85000 МПа	7,800 г/см³	685 МПа	835 МПа
Сталь 60Г	4,800E+01 Вт/(м*К)	0,483 Дж/(г*°С)	11,600 мкм/(м*°С)	204 ГПа	0,26	81000 МПа	7,810 г/см³	785 МПа	980 МПа
Сталь 60С2	2,800E+01 Вт/(м*К)	0,510 Дж/(г*°С)	11,800 мкм/(м*°С)	212 ГПа	0,29	82000 МПа	8,680 г/см³	1100 МПа	1270 МПа

Рисунок 4.3 – Механические и теплофизические свойства используемых материалов.

При проведённом моделировании для моделей были использованы следующие материалы: сталь 09Г2С для станины и кассеты; сталь 40Х для нажимного винта, тяг и валка; сплав БрАЖ9-4 для пластин скольжения, втулок и подпятника.

Набор контактов для созданной из отдельных деталей сборки формируется системой Autodesk Inventor автоматически, на основе их взаимного положения. Из расчётов были исключены пружины, так как они были сформированы в виде сплошных твердых тел без возможности сжатия и растяжения. Для отдельных узлов стана (станина, кассета, пластины скольжения на кассете, винт, нажимная гайка) с целью повышения точности расчета была сформирована уменьшенная сетка размером от 0,5 до 10 мм. Общий вид сгенерированной сетки конечных элементов представлен на рисунке 4.4.

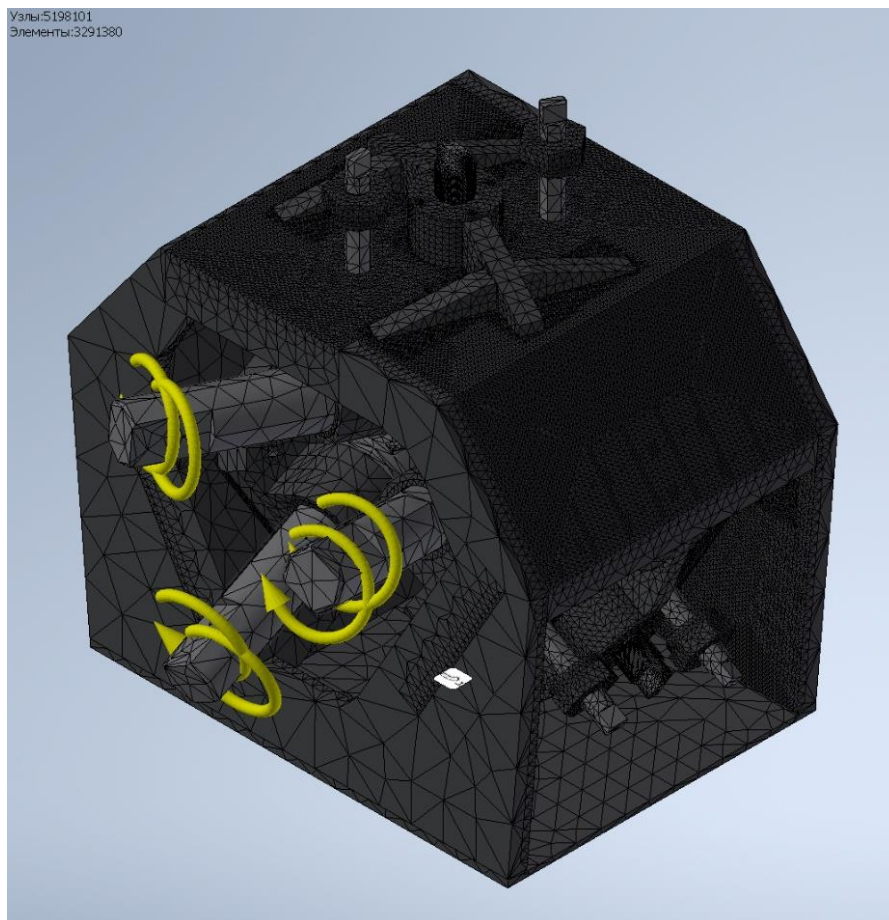


Рисунок 4.4 – Сетка конечных элементов модели, используемая в прочностном расчёте.

На основе расчета определяются эпюры эквивалентных напряжений по Мизесу. Основной критерий для пластичных материалов, вычисляется на основе главных напряжений ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) по формуле (4.4):

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (4.4)$$

Коэффициент запаса прочности ( $n$ ) для пластичных материалов определяется как отношение предела текучести ( $\sigma_T$ ) к максимальному напряжению:

$$n = \frac{\sigma_T}{\sigma_{max}}. \quad (4.5)$$

В случае хрупких материалов в формуле (4.5) вместо предела текучести используется предел прочности или временное сопротивление разрушению ( $\sigma_B$ ).

Стоит отметить, что практически все известные САД-системы в качестве свойства материала для расчета коэффициента запаса прочности (КЗП) используют по умолчанию предел текучести. При необходимости этот параметр можно заменить. В литературе, посвященной расчету клетей прокатных станов, напротив чаще используется временное сопротивление разрушению. В связи с этим, расчетные коэффициенты запаса прочности могут значительно различаться. В работе расчет КЗП проводился при сравнении с пределом текучести материала, однако для сравнения в результаты добавлен КЗП по  $\sigma_B$  (см. табл. 4.2).

Жесткость рабочих клетей отражает упругие деформации, возникающие в клетях стана в процессе прокатки. Так на элементы стана действует усилие прокатки, либо реакция от данного усилия, и при этом они испытывают деформации изменяя свои линейные размеры.

При такой деформации рабочей клетки меняются размеры и точность формы готового проката. Количественно коэффициент жесткости клетки ( $C$ , кН/мм) определяется коэффициентом жесткости по формуле (4.6):

$$C = \frac{P_{max}}{f_{кл}}, \quad (4.6)$$

где  $P_{max}$  – усилие прокатки, кН;

$f_{кл}$  – общая упругая деформация всех элементов рабочей клетки под действием усилия  $P_{max}$ , мм.

Для определения общей упругой деформации  $f_{кл}$  необходимо учесть упругие деформации всех деталей, следовательно, общая упругая деформация определяется по формуле (4.7):

$$f_{\text{кл}} = f_{\text{вал}} + f_{\text{п}} + f_{\text{под}} + f_{\text{н.у}} + f_{\text{ст}}, \quad (4.7)$$

где  $f_{\text{вал}}, f_{\text{п}}, f_{\text{под}}, f_{\text{н.у}}, f_{\text{ст}}$  – упругие деформации соответственно валков, подушек, подшипников, нажимного устройства, станины, мм.

При расчете в САД системе с помощью МКЭ общая упругая деформация (при условии непревышения максимальных напряжений предела текучести материала) определяется выходным параметром «Смещение», мм ( $f_{\text{МКЭ}}$ ). Таким образом, коэффициент жесткости клетки может быть определен по формуле (4.8):

$$C = P_{\text{max}}/f_{\text{МКЭ}}. \quad (4.8)$$

#### 4.1.2 Проверка модели на устойчивость

Далее полученную по разработанному алгоритму модель следует проверить на устойчивость. Под устойчивостью в данном случае имеется в виду минимальное количество внесённых изменений в модель (корректировка статических или динамических параметров; изменений их отношений) после которых адаптивная модель перестанет генерировать стабильный вариант геометрии и будет требовать ручной обработки. Чем выше минимальное количество изменений модели, после которых она начинает отказывать, тем она считается более устойчивой.


Важно иметь в виду, что проверка модели на устойчивость требует рационального отношения к корректируемым параметрам, так как существуют связи и логические зависимости, нарушение которых приведёт к отказу модели в силу естественных причин, связанных с выходом за рамки элементарной (Евклидовой) геометрии. Например, установка угла раскатки более  $90^\circ$ . В связи с этим, существуют рекомендуемые диапазоны значений –  $10-25^\circ$  для угла подачи и  $5-15^\circ$  для угла раскатки, определенные на основе промышленного опыта эксплуатации и известных конструкций клеток винтовой прокатки.


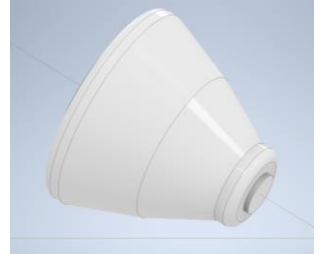
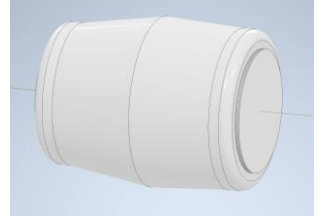


Также стоит отметить, что в выбранной программной среде Autodesk Inventor предусмотрена проверка интерференции собираемых в сборке объектов. Так, если в собранной модели после адаптивных перестроений случилось пересечение твердых тел, то система выдаст об этом соответствующее предупреждение. Отсутствие таких предупреждений говорит о том, что габаритные размеры деталей и узлов определены корректно.

Полученная параметрическая модель может считать устойчивой, так как позволяет адаптивно перестраиваться в диапазоне нескольких принятых типоразмеров клеток (от 10-30 до 60-160) и значения углов  $\beta$  и  $\delta$ . В некоторых случаях установки исходных параметров вне рекомендуемых диапазонов модель позволяет сформировать валок-бочку, однако,

дальнейшие связанные с ней узлы и детали будут выдавать ошибки построений и интерференции (таблица 4.1).

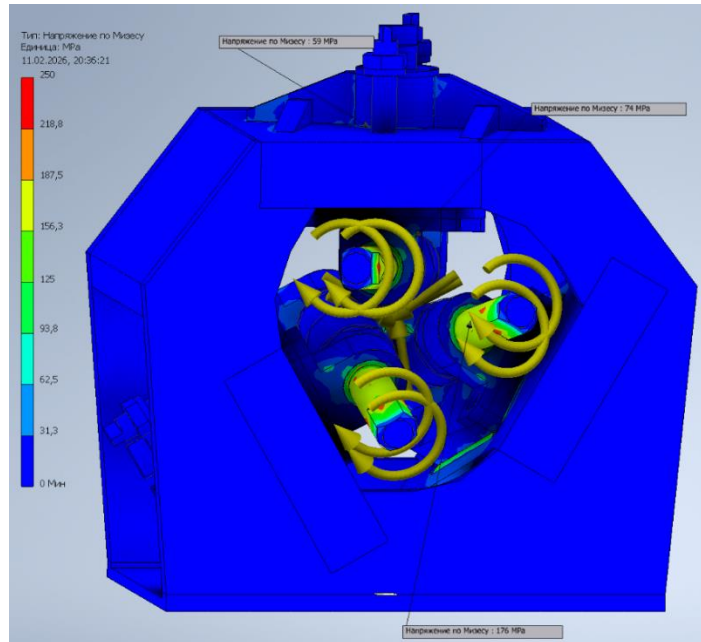
Таблица 4.1 Таблица с результатами проверки построений и интерференций для некоторых наборов исходных параметров.

№ варианта проверки	Угол подачи $\beta$ , градусы	Угол раскатки $\delta$ , градусы	Максимальный диаметр заготовки, мм	Диаметр валка в пережиме, мм	Интерференция	Форма валка
1	20	5	30	80	нет	
2	40	5	30	80	да	
3	20	5	160	80	да	
4	20	5	70	160	нет	
5	10	15	70	160	нет	

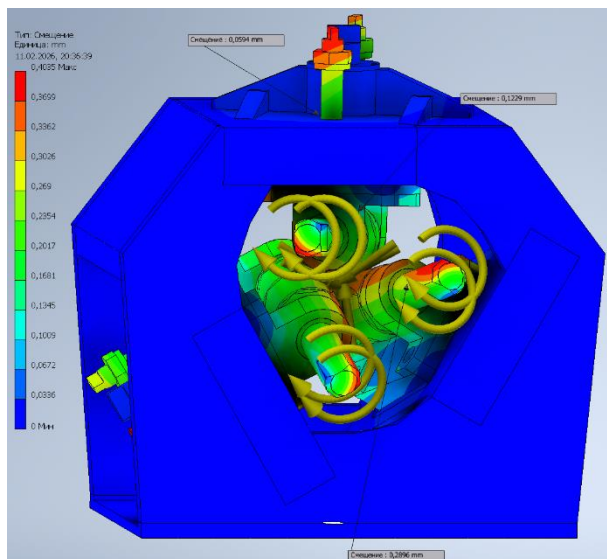
6	25	15	70	160	нет	
7	18	30	70	160	да	
8	20	5	160	230	нет	
9	18	8	160	230	нет	
10	20	5	160	100	да	

### 4.1.3 Проверка полученных моделей под нагрузками

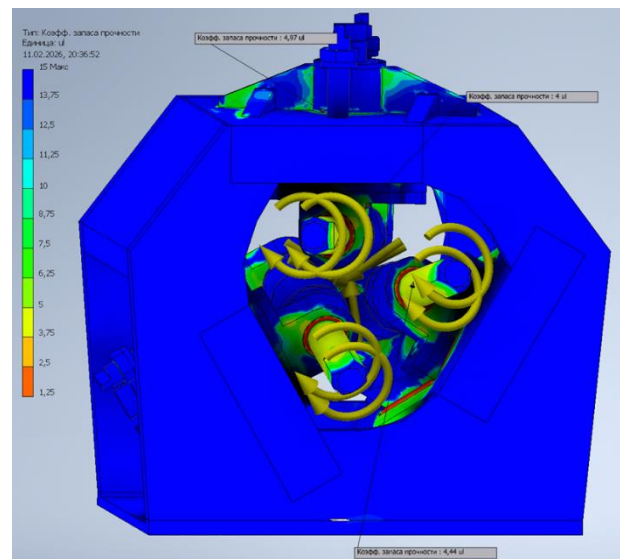
Полученные эпюры распределения напряжений по Мизесу, смещений и коэффициента запаса прочности для модели типоразмера 10–30 представлены на рисунке 4.5 (а, б и в, соответственно).



(a)



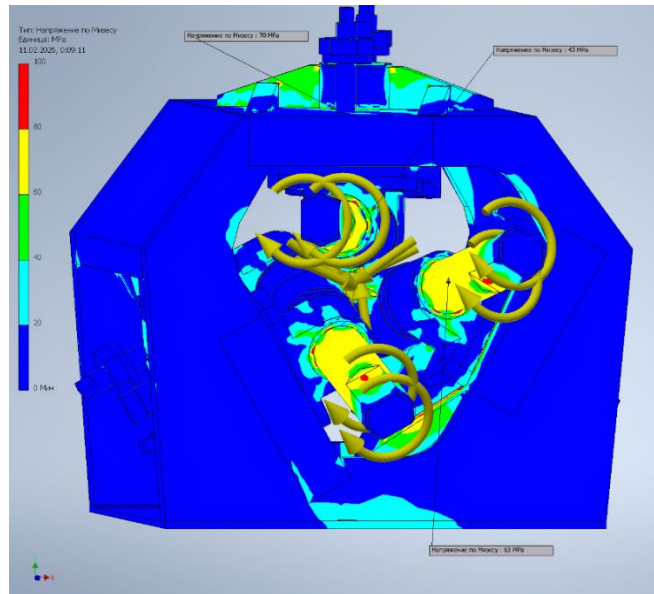
(б)



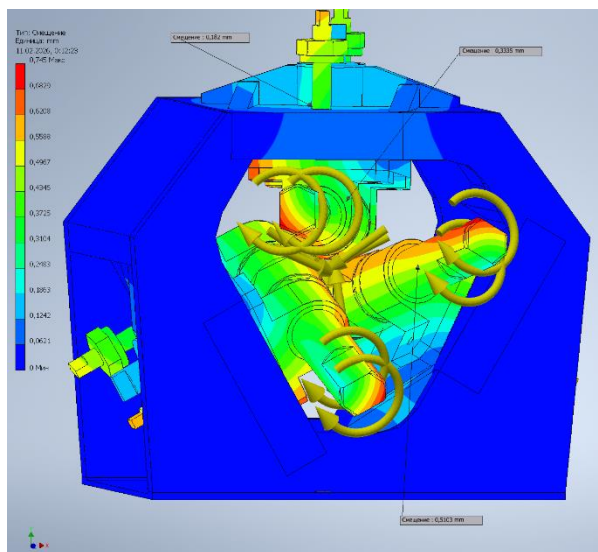
(в)

Рисунок 4.5 – Результаты проверочного расчёта модели типоразмера 10–30: (а) – эпюра распределения напряжений по Мизесу; (б) – эпюра распределения смещений; (в) – эпюра распределения коэффициента запаса прочности.

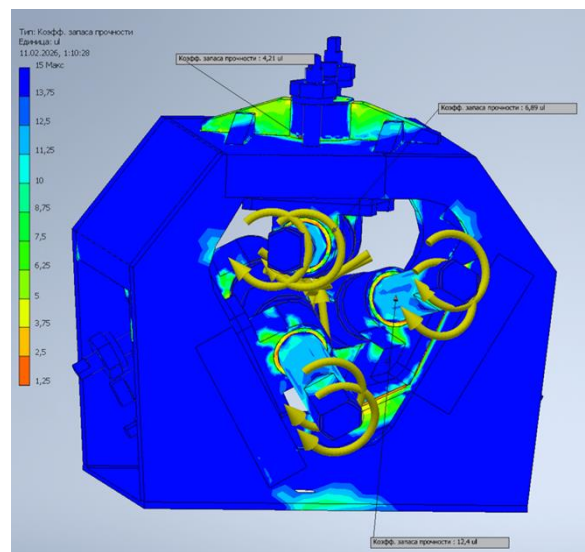
Полученные эпюры распределения напряжений по Мизесу, смещений и коэффициента запаса прочности для модели типоразмера 30–70 представлены на рисунке 4.6 (а, б и в, соответственно).



(а)



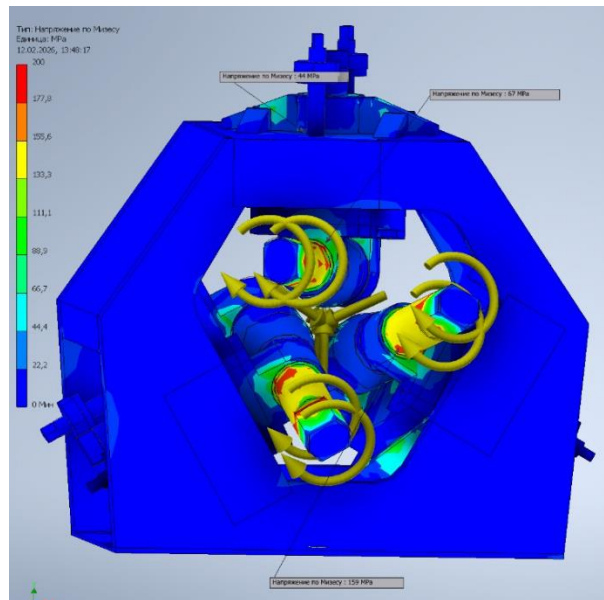
(б)



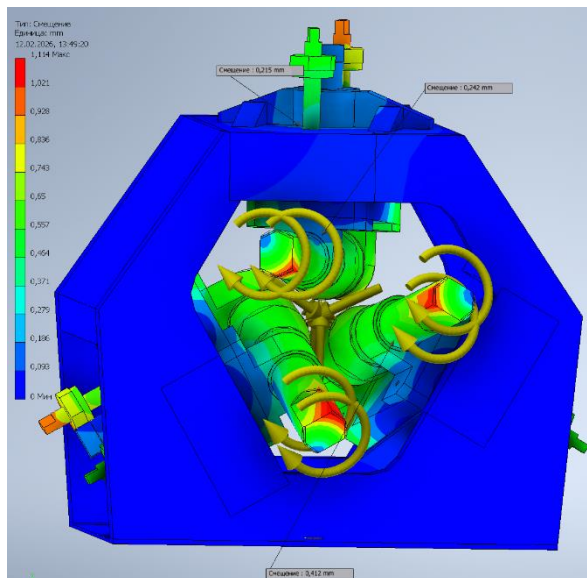
(в)

Рисунок 4.6 – Результаты проверочного расчёта модели типоразмера 30–70: (а) – эпюра распределения напряжений по Мизесу; (б) – эпюра распределения смещений; (в) – эпюра распределения коэффициента запаса прочности.

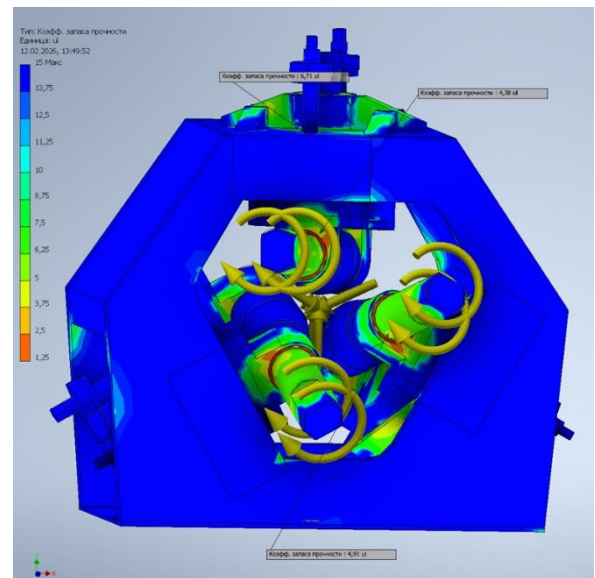
Полученные эпюры распределения напряжений по Мизесу, смещений и коэффициента запаса прочности для модели типоразмера 60–160 представлены на рисунке 4.7 (а, б и в соответственно).



(а)



(б)



(в)

Рисунок 4.7 – Результаты проверочного расчёта модели типоразмера 60–160: (а) – эпюра распределения напряжений по Мизесу; (б) – эпюра распределения смещений; (в) – эпюра распределения коэффициента запаса прочности.

#### 4.1.4 Сводный анализ произведённых расчётов

Сравнительные результаты проверочных расчётов моделей всех рассмотренных типоразмеров были сведены в таблицу 4.3. Наибольшие напряжения для валка возникают в очаге деформации на контактной поверхности, для подушек – в местах контакта со втулками, для станины – на верхней поперечине и в месте контакта пластин скольжения с кассетой.

Рассчитанные напряжения не превышают предел текучести для выбранных материалов, однако минимальный коэффициент запаса прочности отдельных элементов

станины получился ниже рекомендуемых традиционно значений (для крышки станины 5-6, для направляющих пластин скольжения 2,4-4,3). В соответствии с разработанным алгоритмом, предполагается доработка отдельных узлов станины и повторное проведение проверочных расчетов. В частности, возможно увеличение толщины крышки для корпуса гайки и повышение жесткости корпуса кассет. Также возможным вариантом является замена материала для наиболее нагруженных деталей. Необходимо учитывать, что рекомендованные КЗП 5-10 приводятся в литературе при расчете по параметру  $\sigma_b$ , в то время как полученные значения определены по величине  $\sigma_T$ .

Наибольшие смещения выявлены на валке и подушке, которые составляют до 1,07 мм для валка и 0,86 мм для подушки. При этом они не превышают допустимых предельных отклонений по диаметру прутка по ГОСТ 22411-77 [101] и ГОСТ 26492-85 [102]. Результаты расчетов показывают, что для подушек валков и кассеты наибольшее влияние на величину смещения оказывает момент прокатки. Также в спроектированных моделях не учтены посадки деталей и зазоры между вращающимися и перемещающимися линейно элементами, что дополнительно создает концентраторы напряжений и несколько завышенные значения смещений деталей при упругой деформации.

При проектировании конструкций, механизмов или оборудования возникает известный компромисс между прочностью/надежностью конструкции и ее массой/металлоемкостью. При эксплуатации рабочих клетей винтовой прокатки они подвергаются комплексному воздействию разнонаправленных нагрузок, циклический воздействию. Каждая деталь отдельно может работать в разных условиях нагружения, и имеет различную форму и способ изготовления (литье, сварка, ОМД и т.д.), поэтому при назначении коэффициентов запаса прочности это также должно учитываться.

Производственный опыт показывает, что коэффициент запаса прочности приблизительно 3-5 является разумным инженерным значением для валков станов горячей прокатки, обеспечивая приемлемый уровень напряжений при минимизации риска разрушения валков [103].

Единого же универсального значения для КЗП не существует. Типичные диапазоны коэффициента запаса прочности для основных конструктивных элементов (корпус, крепления, основание) составляет 5–8 (или выше). Это относится к высоконагруженным, критически важным с точки зрения безопасности компонентам, отказ которых может привести к катастрофическим последствиям. Они рассчитаны на максимально возможную нагрузку при прокатке (включая ударные нагрузки при захвате и освобождении очага деформации). Многие прокатные станы проектируются в соответствии с историческими стандартами производителей (например, ВНИИМЕТМАШ, ЭЗТМ, SMS group, Danieli) или

отраслевыми рекомендациями (например, Ассоциации инженеров металлургической промышленности - AISE), которые предписывают консервативные завышенные значения коэффициента запаса прочности. Основные причины этого заключаются в интенсивности и неопределенности эксплуатационных режимов:

- чрезвычайно высокие и динамические нагрузки, возникающие из-за ударных нагрузок при входе заготовки в валки;

- термические напряжения (особенно для валков), вызывающих значительные внутренние напряжения;

- усталостные нагрузки из-за множества циклов нагрузки в течение всего срока службы;

- экономические последствия отказов: выход из строя или поломка деталей клетки приводят к длительным простоям, дорогостоящим заменам компонентов, потенциальному риску серьезных травм или смертельных исходов;

- неопределенность свойств материала: несмотря на наличие современных моделей, точное напряжение текучести материала при высоких скоростях деформации и температурах может варьироваться;

Современный подход к проектированию основывается не на одном значении КЗП, а на многостороннем анализе конструкции в контексте сборки и отдельных деталей с применением современных методов инжиниринга. Это позволяет исключить завышения КЗП и обеспечить рациональную массу, металлоемкость и габариты рабочей клетки при достаточном уровне надежности. Ниже, в таблице 4.2 представлены ориентировочные значения КЗП на основе анализа литературных данных.

Таблица 4.2. Ориентировочные значения КЗП для основных деталей и узлов прокатного стана

Компонент	Ориентировочный диапазон КЗП
Станина	5 - 8+
Валки	3 - 5
Шпиндели и муфты	3 - 6
Подушки	3 - 5

Таблица 4.3 Сравнительные результаты проверочных расчётов моделей типоразмеров 10–30, 30–70 и 60–160.

Узел/Деталь	Напряжение по Мизесу, МПа	$\sigma_T / \sigma_B$ используемого материала, МПа	Мин. КЗП (по $\sigma_T / \sigma_B$ )	Смещение, мм	Предельные отклонения* по диаметру прутка, мм (ГОСТ 22411–77)	Предельные отклонения* по диаметру прутка, мм (ГОСТ 26492–85)	Коэффициент жесткости С, МН/мм
<b>Типоразмер 10-30</b>							
Валок	176	780 / 980	6,7 / 8,4	0,29	+1,0 -0,5	+0,4 -0,6	0,202
Подушка	74	295 / 630	4,7 / 10,1	0,12			
Станина	59	295 / 630	5,2 / 11,1	0,06			
<b>Типоразмер 30-70</b>							
Валок	163	780 / 980	6,3 / 7,9	0,74	+1,0 -0,5	+0,6 -1,0	0,440
Подушка	68	295 / 630	5,7 / 12,1	0,62			
Станина	70	295 / 630	6,1 / 13,0	0,18			
<b>Типоразмер 60-160</b>							
Валок	159	780 / 980	5,9 / 7,4	1,07	+1,5 -1,5	+1,0 -2,0	2,291
Подушка	67	295 / 630	4,3 / 9,1	0,86			
Станина	92	295 / 630	5,1 / 10,9	0,22			
* во всех случаях выбраны отклонения для групп повышенной точности							

#### 4.4 Выводы по главе 4

В данной главе была описана проверка и валидация полученной с помощью разработанного алгоритма параметрической модели трёхвалкового стана винтовой прокатки. Полученная модель была использована для формирования клетей трёх типоразмеров: 10–30, 30–70 и 60–160.

Модели клетей были проверены на устойчивость к рабочим нагрузкам с помощью симуляции в программной среде Autodesk Inventor, используя метод конечных элементов. На основе симуляции были сгенерированы эпюры распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, деформаций, смещений и коэффициента запаса прочности в контексте сборки. Модели показали достаточный уровень прочности к рабочим нагрузкам. Максимальное смещение в каждом расчёте не превышает предельные допуски на прокат по ГОСТ 22411–77 и ГОСТ 26492–85. Коэффициент жёсткости принимает допустимые значения.

Параметрическая модель является достаточно устойчивой, так как способна к адаптивному перестроению под наиболее распространенные типоразмеры, значения основных углов и прочие исходные данные.

## ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ И РАЗРАБОТКА ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИ

### 5.1 Сравнение с существующими аналогами

Сравнение существующих типоразмеров клеток с полученными моделями выполняется для валидации разработанного алгоритма и подтверждения преимуществ полученных по алгоритму моделей. Полученные данные были сведены в таблицу 5.1. Сравнительный анализ массы, условного объёма и металлоёмкости позволяет объяснить, за счёт каких инженерных решений достигается снижение габаритов и трудоёмкости изготовления при сохранении или повышении эксплуатационных характеристик.

Кроме того, такое сравнение необходимо для принятия проектных и управленческих решений, например подготовки технико-экономического обоснования для заказчика или руководства, оценки стоимости и времени изготовления оборудования, времени проектирования, условий эксплуатации и обслуживания и др.

Новые модели клеток демонстрируют значительное снижение массы по сравнению с существующими типоразмерами при сопоставимых диапазонах прокатки. В зависимости от типоразмера уменьшение массы составляет ориентировочно 15–65 %, что свидетельствует об удачном выборе компоновки, оптимизации формы деталей, толщины и габаритов, а также исключении избыточных конструктивных элементов (например, барабанов, клиновых нажимных устройств). Снижение массы положительно влияет на транспортировку, монтаж, время перевалки и общие капитальные затраты.

Условный объём (то есть объём, занимаемый по трем габаритным размерам) рабочих клеток в новых моделях также существенно сокращён – в среднем в 1,3–3 раза по сравнению с существующими конструкциями. Это указывает на более компактную компоновку узлов рабочей клетки, рациональное использование внутреннего пространства и отсутствие «лишних» ходов при позиционировании элементов. Уменьшение объёма позволяет снизить занимаемую площадь, упростить интеграцию клетки в линию, повысить удобство эксплуатации и обслуживания.

Новые модели характеризуются более высоким показателем относительной металлоёмкости, определяемой как отношение массы вала к общей массе клетки. Этот параметр показывает какой процент от общей массы оборудования занимает валок, как основной элемент конструкции. Данный параметр возрастает с 0,9–2,6 % для существующих типоразмеров до 2,5–4,6 % для новых конструкций. Рост относительной металлоёмкости обусловлен уменьшением общей массы клетки относительно сопоставимой

массы валка, что обеспечивает требуемую жёсткость, прочность и эксплуатационную надёжность при более компактных габаритах.

Полученные сравнительные значения массы, условного объёма и металлоёмкости были сведены в гистограммы 5.1 – 5.3.

Одним из основных преимуществ применения разработанного алгоритма и параметрической модели рабочей клетки является значительное сокращение трудозатрат и времени на все этапы проектирования. В таблице 5.1 представлены ориентировочные сроки проектирования по традиционной схеме, включая все основные этапы от эскизного проекта до рабочего проектирования и оформления РКД. По данным производителей станов винтовой прокатки (АО «Исток МЛ», ЭЗТМ) суммарное минимальное время проектирования составляет от 9 до 12 месяцев. При использовании параметрической модели практически все этапы проектирования, кроме выполнения проверочных расчетов, исключаются, что позволяет сократить общие сроки проектирования трехвалковой клетки типовой конструкции до одного месяца. При этом работу над проектом может вести один инженер-конструктор.

Еще одним важным критерием эффективности конструкции и эксплуатации прокатного стана является технология перевалки, точнее ее простота, удобство, временные затраты и трудоемкость. Опыт эксплуатации известных конструкций министанов винтовой прокатки показывает, что трудоемкость перевалки возрастает с увеличением типоразмера клетки. Ориентировочное время перевалки клетки типоразмера 10-30 составляет от 0,5 до 1 ч, для типоразмера 14-40 данный параметр увеличивается до 1-2 ч, а для клеток большего типоразмера составляет приблизительно 3 ч. Для спроектированных по алгоритму клеток время перевалки не будет превышать 0,5-2 ч. Типовая конструкция предусматривает одинаковую последовательность действий для всех типоразмеров. При этом для извлечения валка из клетки производится демонтаж только одной подушки и не требуется производить разбор станины, что существенно упрощает технологию перевалки и время на ее реализацию. Подробное описание схемы перевалки валков представлено в пункте 5.2.

Таблица 5.1 Таблица сравнения параметров моделей с существующими аналогами клеток.

№	Параметр	Существующие типоразмеры клетки						Модель		
		10-30	14-40	30-80А	30-80Б	40-120	90-220	10-30	30-70	60-160
1	Масса клетки, т	0,215	0,625	3,88	3,8	6,68	14,8	0,183	1,374	4,703
2	Габариты рабочей клетки НхВхL, мм	440х420х510	765х630х880	1200х1500х800	1200х1500х900	1800х1800х1260	2870х3880х1060	510х500х310	950х960х640	1350х1470х880
3	Условный объём, м <sup>3</sup>	0,09	0,42	1,44	1,62	4,08	11,80	0,07	0,58	1,75
4	Количество деталей, штук	34	46	41	59	45	55	25	25	25
5	Время проектирования (месяцы):									
	- эскизный проект	3	2	3	3	3	3-4			
	- технический проект	3	5	4	4	4	4			
	- рабочее проектирование	3	5	5	5	5	4			
ИТОГО	9	12	12	12	12	11-12	1*	1*	1*	
6	Показатель металлоемкости (Мв/Мкл)	$5,6 / 215 = 0,0260$	$7,85 / 625,2 = 0,0126$	$34,9 / 3880 = 0,0090$	$49 / 3800 = 0,0129$	$110 / 6682 = 0,0165$	$293,2 / 14782,68 = 0,0198$	$4,49 / 183 = 0,0245$	$63,73 / 1374 = 0,0464$	$171,83 / 4703 = 0,0370$
		~ <b>2,60 %</b>	~ <b>1,26 %</b>	~ <b>0,89 %</b>	~ <b>1,29 %</b>	~ <b>1,65 %</b>	~ <b>1,98 %</b>	~ <b>2,45 %</b>	~ <b>4,64 %</b>	~ <b>3,70 %</b>
7	Перевалка									
	- Оснащение - Ориентировочное время, ч	Вручную 0,5-1	Вручную 1-2	Кран-балка 3	Кран-балка 3	Кран-балка 3	Кран-балка 5	Вручную 0,5-1	Кран-балка 2	Кран-балка 2

\*трудоzатраты на ввод исходных данных, проверочные расчёты, оценку корректности работы модели и её корректировку

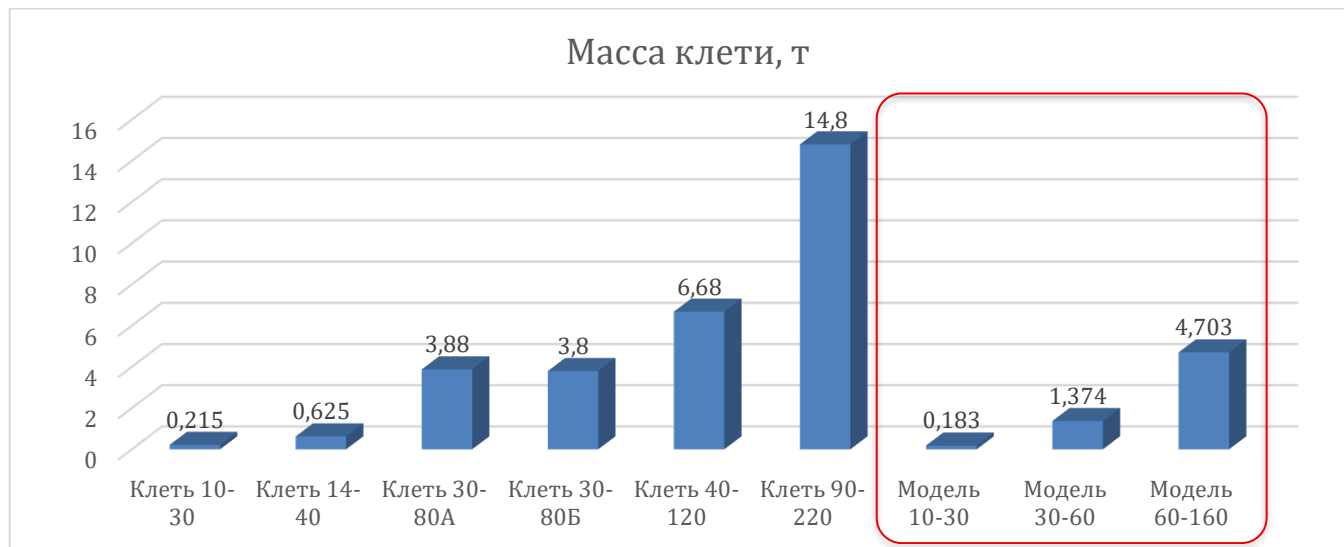


Рисунок 5.1 – Гистограмма сравнения массы существующих клеток и полученных моделей.

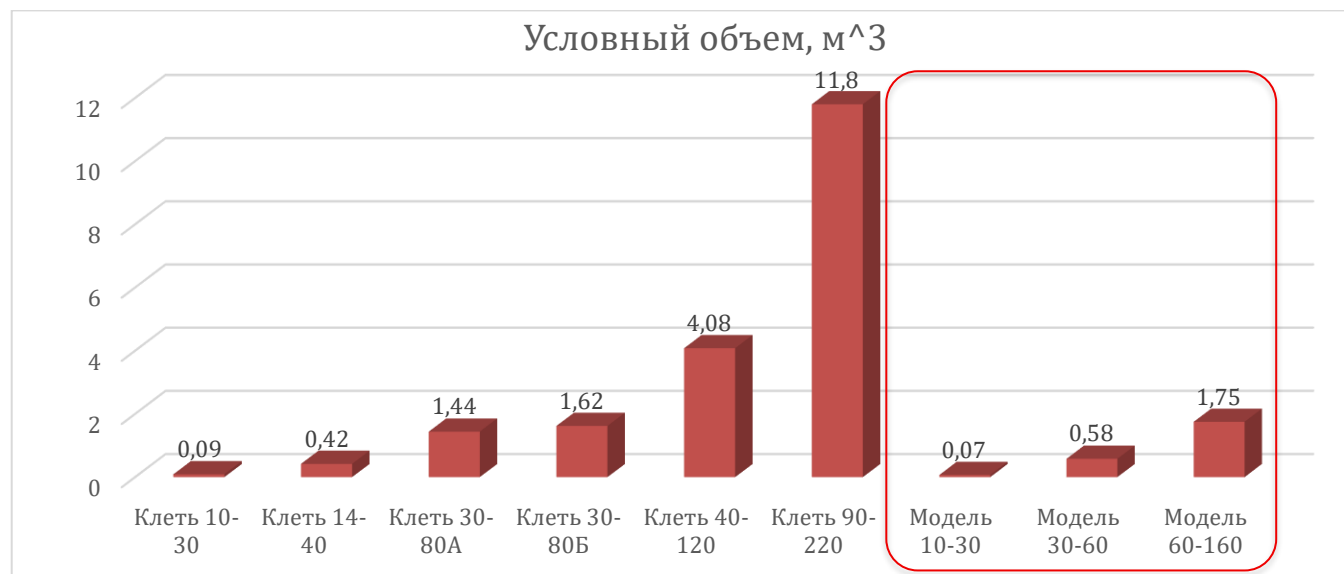


Рисунок 5.2 – Гистограмма сравнения условного объема существующих клеток и полученных моделей.

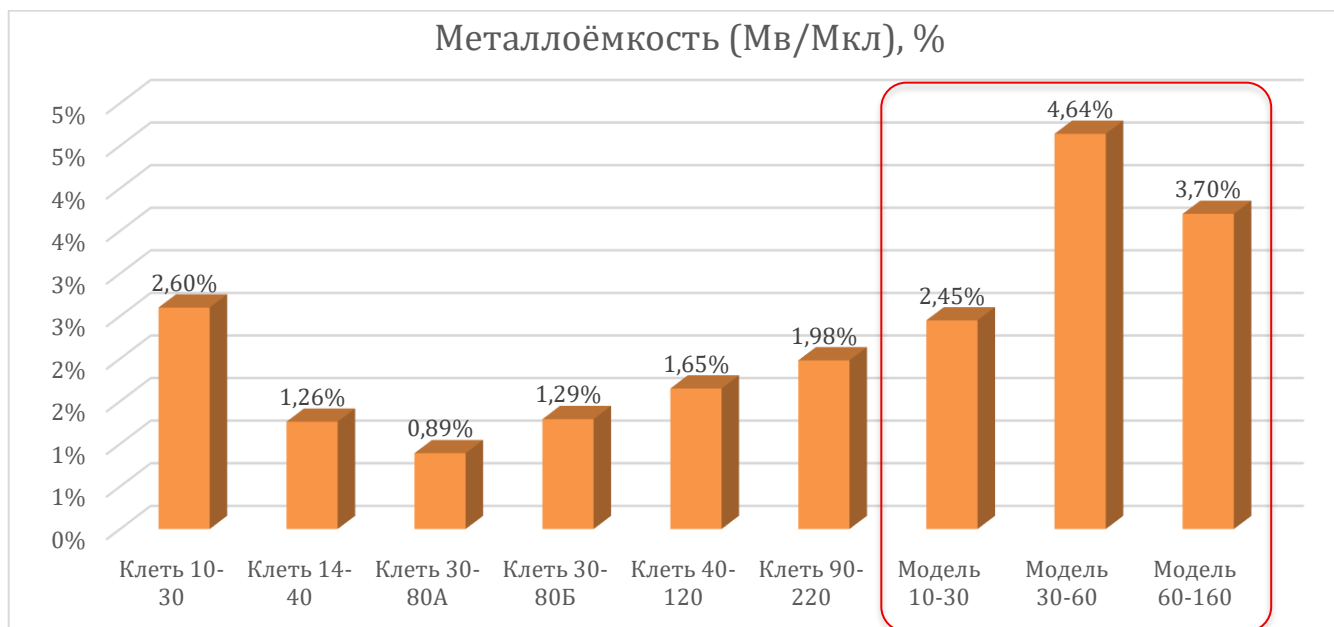


Рисунок 5.3 – Гистограмма сравнения металлоёмкости существующих клеток и полученных моделей.

## 5.2 Разработка процесса перевалки валков рабочей клетки

Технология перевалки рабочих валков заключается в замене изношенных валков новыми без смены кассет и разбора станины.

Для рабочих клетей, спроектированных на основе разработанного алгоритма, процесс перевалки валков реализован по поэтапной схеме, обеспечивающей технологичность, безопасность и минимизацию времени простоя стана. Конструктивные решения клетки позволяют выполнять перевалку как с применением грузоподъемных средств, так и вручную, в зависимости от типоразмера, что расширяет область практического применения разработанных моделей.

Среднее время восстановления на объекте силами и средствами дежурной смены – не более 0,5...2 ч в зависимости от типоразмера клетки.

- отключить электродвигатели главного привода вращения рабочих валков;
- установить рабочие валки с помощью механизма сведения-разведения валков в положение, при котором будет возможен доступ к крепежным болтам подушек;
- перекрыть подачу воды и пластичной смазки к стану;
- отсоединить трубопроводы подачи воды и смазки;
- отсоединить шпиндельные устройства от валов рабочих валков и уложить шпиндели на надежные опоры;
- демонтировать входную проводку;
- демонтировать выходную проводку;
- с входной стороны стана (сторона привода) отвернуть крепежные болты входной подушки верхнего валка и краном или вручную (в зависимости от типоразмера стана) извлечь входную подушку и подшипниковую втулку с валка и уложить ее на ровную поверхность. Для клетей большого типоразмера валок на данном этапе фиксируется с использованием кран-балки и стропов, тогда как для клетей малого типоразмера фиксация и удержание валка допускается выполнять вручную;
- извлечь вал-бочку из подшипниковой втулки и выходной подушки и уложить на ровную поверхность;
- повторить последние две операции для двух оставшихся валков в аналогичной последовательности;
- подушки очистить от окалины и грязи, смазать посадочные места под подушками валков;
- промыть подшипники скольжения керосином и проконтролировать износ;
- перед установкой валков в подушки произвести смазку опорных поверхностей вращения;

- перед установкой подушек с новыми валками, очистить от окалины и грязи направляющие планки и основание станины клетки и нанести, при необходимости, густую смазку;

После установки нового или восстановленного валка сборка и монтаж валкового узла выполняются в обратной последовательности, при этом конструкция клетки обеспечивает сохранение взаимного положения элементов, что снижает требования к дополнительной юстировке и способствует сокращению общего времени перевалки.

На рисунке 5.4 представлены этапы перевалки валков рабочей клетки.

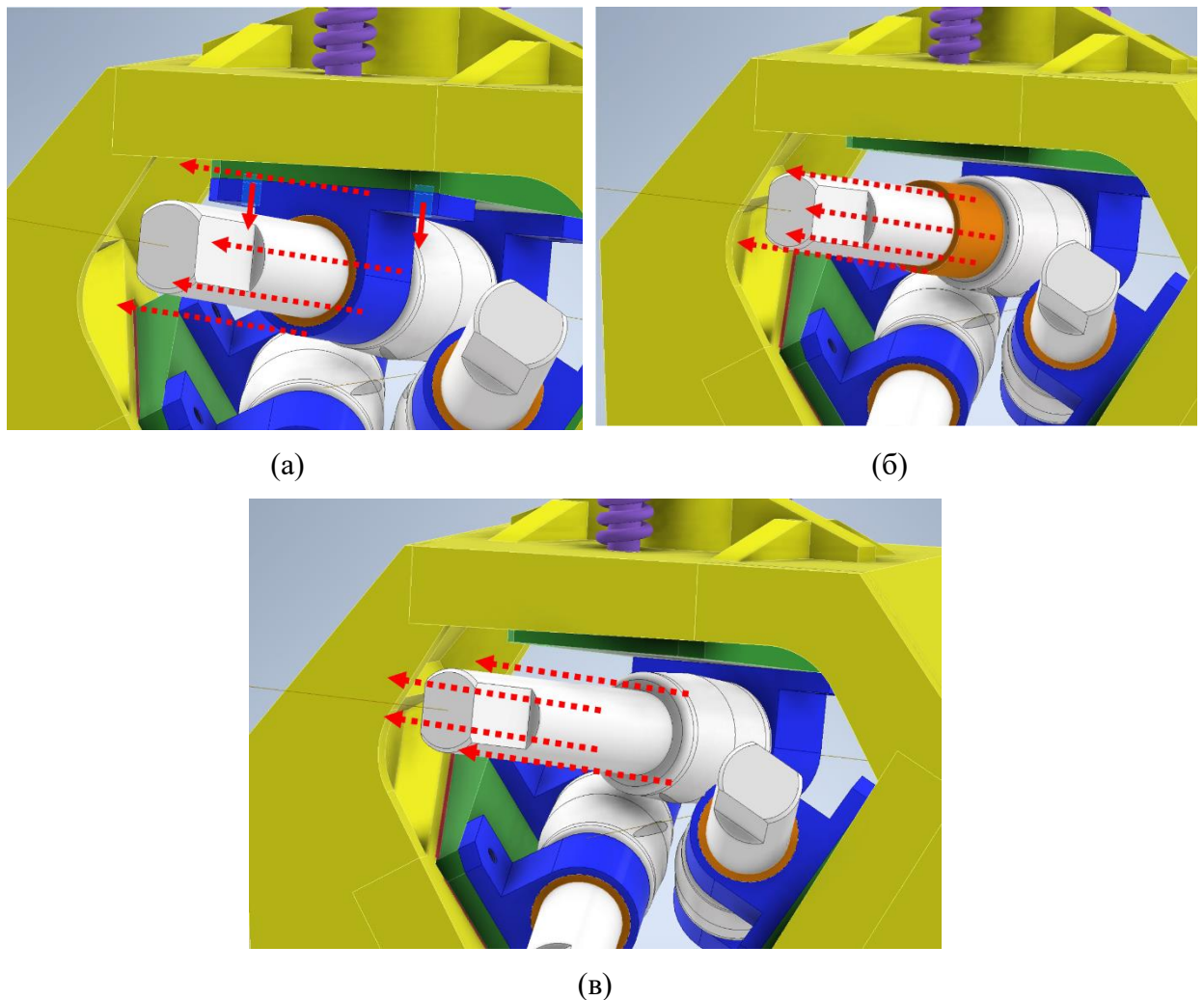


Рисунок 5.4 – Этапы перевалки валков рабочей клетки: (а) – отсоединение подушки; (б) – отсоединение втулки; (в) – извлечение валка.

### 5.3 Разработка шаблонов для генерации конструкторской документации

Последним этапом разработанного алгоритма является выгрузка конструкторской документации по полученным моделям и деталям на основе предустановленных шаблонов чертежей в соответствии с ГОСТ и ЕСКД. Программная среда Autodesk Inventor позволяет

автоматически формировать чертежи для спроектированных деталей и сборочных единиц, а также автоматически обновлять их в случае обновления исходных моделей. Детализация данного этапа проектирования представлена на рисунке 5.5.

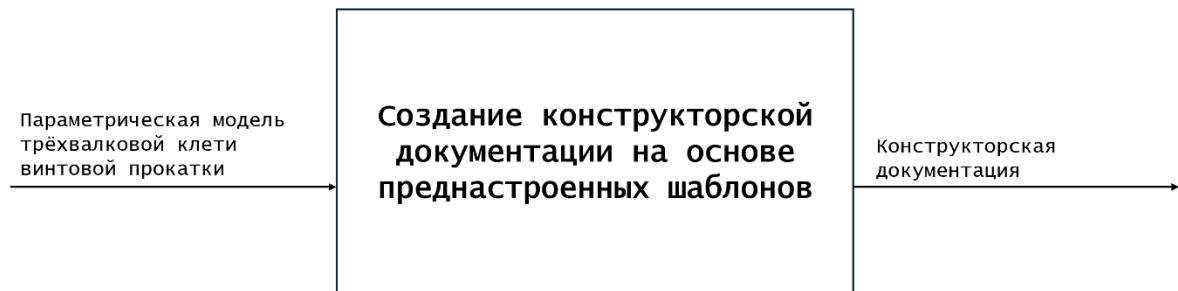


Рисунок 5.5 – Детализация этапа «Создание конструкторской документации на основе предустановленных шаблонов».

Пример сгенерированного чертежа входной подушки представлен на рисунке 5.6. Автоматизированное формирование чертежей помогает значительно сократить время разработки стана на финальных этапах проектирования (разработка рабочего проекта документации для изготовления). Полученные чертежи можно использовать для изготовления и сборки разработанных деталей и элементов, в том числе с помощью оборудования с ЧПУ. Пример сгенерированного чертежа кассеты представлен на рисунке 5.7.

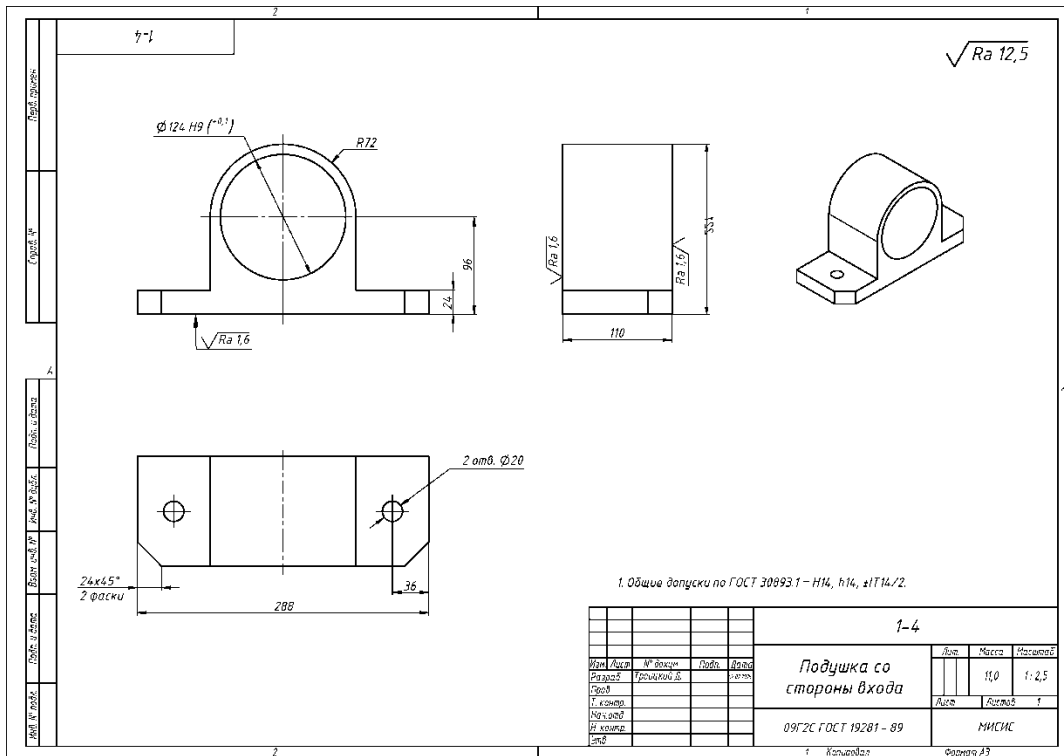


Рисунок 5.6 – Пример автоматически сгенерированного чертежа входной подушки.

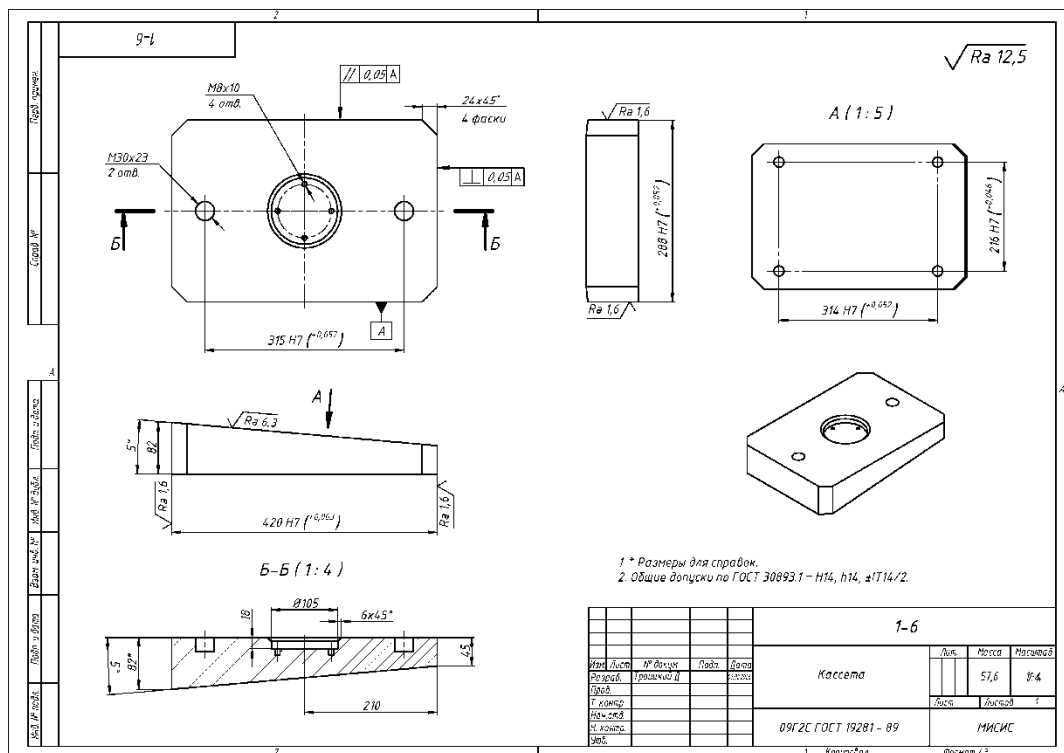


Рисунок 5.7 – Пример автоматически сгенерированного чертежа кассеты.

#### 5.4. Выводы по главе 5

Сравнение существующих типоразмеров клеток с полученными по разработанному алгоритму моделями выполнено с целью его валидации и обоснования технических и экономических преимуществ. Анализ массы, условного объёма и металлоёмкости показывает, что при сопоставимых диапазонах прокатки новые модели обеспечивают снижение массы на 15–65 % и уменьшение условного объёма в 1,3–3,0 раза за счёт рациональной компоновки, оптимизации формы станины и исключения избыточных элементов. При этом повышение относительной металлоёмкости с 0,9–2,6 % до 2,5–4,6 % обусловлен снижением общей массы клетки по отношению к массе вала, как основного элемента прокатной клетки.

На основе полученной конструкции разработан и описан процесс перевалки валков для клеток, спроектированных по разработанному алгоритму. Перевалка реализована по рациональной поэтапной схеме без разбора станины и частичного демонтажа подушек, что существенно сокращает время и трудоемкость выполнения перевалки. Конструктивные решения позволяют выполнять основные операции без демонтажа смежных узлов, с возможностью как крановой, так и ручной фиксации валков в зависимости от типоразмера клетки.

Адаптивная модель позволяет автоматически выгружать чертежи, оформленные в соответствии с ГОСТ и ЕСКД для ускорения разработки на финальных этапах проектирования.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основании анализа современных способов инжиниринга и методологий проектирования определены подходы и основные критерии при разработке алгоритма: масштабируемость по типоразмерам, модульное создание от очага деформации к общему виду, параметризация и принципы наследования, кодирования, ассоциативные связи, проверка устойчивости на основе стресс-тестов.

2. Разработаны зависимости размеров, формы и взаимного контакта между основными узлами и деталями рабочей клетки. Для проектирования выбрано использование конструкции министанов с блочной конструкцией и нерегулируемыми заданными углами подачи и раскатки.

3. Разработан алгоритм автоматизированного параметрического проектирования трёхвалковой клетки винтовой прокатки и создана трехмерная параметрическая модель рабочей клетки трехвалкового стана винтовой прокатки с возможностью перестроения в широком диапазоне варьирования основных технико-технологических параметров (угол раскатки  $5-15^\circ$ , угол подачи  $10-25^\circ$ , диаметр заготовки 20-200 мм).

4. Выполнен выбор и компиляция расчетных методик в единый программно-расчетный модуль для получения данных для реализации проектирования и проведения проверочных расчетов. В ПРМ автоматически производится расчет геометрии очага деформации и калибровки валка, энергосиловых параметров, геометрии и прочности подшипниковых втулок и нажимного винта и гайки.

5. Проведены проверочные прочностные расчеты и стресс-тесты на устойчивость модели и работоспособности алгоритма в условиях варьирования основных технологических параметров и входных данных. Разработанная параметрическая модель обладает достаточной прочностью (КЗП от 7 до 13 по  $\sigma_b$ ), жёсткостью и устойчивостью к адаптивным перестроениям и обеспечивает соответствие эксплуатационным требованиям при максимальных расчётных нагрузках.

6. Сравнение существующих типоразмеров клеток с моделями, полученными по алгоритму, показывает, что при сопоставимых диапазонах прокатки новые модели обеспечивают снижение массы на 15–65 % и уменьшение условного объёма в 1,3–3,0 раза за счёт рациональной компоновки, оптимизации формы станины и исключения избыточных элементов. При этом повышение относительной металлоёмкости с 0,9–2,6 % до 2,5–4,6 % обусловлено снижением общей массы клетки по отношению к массе валка, как основного элемента прокатной клетки.

7. Разработаны преднастроенные шаблоны чертежей для деталей и сборочных единиц, обеспечивающие автоматическую генерацию рабочей конструкторской документации для рабочей клетки, спроектированной в соответствии с разработанным алгоритмом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Javier Monedero (2000). Parametric design: a review and some experiences. , 9(4), 369–377. doi:10.1016/s0926-5805(99)00020-5
2. Параметрическое моделирование. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amp.ru.what-this.com/1062101/1/parametricheskoe-modelirovanie.html> Дата обращения: 13.09.2021
3. Topology Optimization. Theory, Methods, and Applications. Martin Philip Bendsøe, Ole Sigmund. –Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. – 370 с.
4. Генеративный дизайн: на пороге новой эпохи проектирования. . [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm\\_87\\_11.html](https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_87_11.html) Дата обращения: 21.09.2021
5. Топологическая оптимизация геометрии изделия как путь повышения прибыльности предприятия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.iqb.ru/geometry-topology-optimization/> Дата обращения: 22.09.2021
6. Руководство для учащихся по изучению программного обеспечения SolidWorks®
7. Расчеты рабочих клеток прокатных станов (методика и примеры): Методическое пособие по курсу «Оборудование цехов ОМД» для студентов всех форм обучения специальности 110600 - Обработка металлов давлением / В.А. Шилов, Ю.В. Инатович. Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 69 с.
8. Королёв А.А. Конструкция и расчёт машин и механизмов прокатных станов. М.: Металлургия; 1985: 376.
9. История конструкции трёхвалковой станов поперечно-винтовой прокатки. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://smekni.com/>. – Дата обращения: 13.04.2021
10. Технология и оборудование трубного производства: учебник для вузов / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
11. Технология винтовой прокатки / И.Н. Потапов, П.И. Полухин. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
12. Технологические процессы и оборудование трубного производства. Научное издание. Научные школы Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета) – 75 лет. Становление и развитие / П.И. Полухин, А.П. Коликов, Б.А. Романцев. – М.: МИСиС, 1997, – 628 с.
13. Galkin, S.P., Kharitonov, E.A. & Romanenko, V.P. Screw rolling for pipeproduction. Steel Transl. 39, 700-703 (2009). <https://doi.org/10.3103/S096709120908018X>.

14. Потапов Н.И. Разработка и внедрение технологии и рабочего инструмента радиально-сдвиговой прокатки высоколегированных сталей и сплавов: автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1987. – 21 с
15. Воробьев С.И. Разработка и внедрение промышленной технологии радиально-сдвиговой прокатки высоколегированных сталей и сплавов: автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1990. – 22 с.
16. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учеб. пособие / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Д.Ш. Нухов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 164 с.
17. Патент №2361689 РФ, МПК В21В 19/04. Способ получения гильз / Овчинников Д.В. и др. – заявл. 06.12.2007 г., опубл. 20.07.2009 г.
18. Тартаковский Б.И. Разработка, внедрение и освоение нового оборудования и технологии для производства горячекатаных труб: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.13 – Москва, 2012. – 262 с.
19. M. Albedyhl, E. Bretsehneider. The 3-roll planetary mille a new high reduction machine, *Iron Steel Eng.* 56 (4) (1979) 57-60.
20. Конструкция станов поперечно-винтовой прокатки с планетарнодифференциальным приводом рабочих валков за рубежом (Обзор. информ. Сер. Трубное производство. Вып. 3) // В.Н. Шевченко, З.С. Вольшонок, В.И. Солодихина и др. / Ин-т «Черметинформация». – М., 1989. – 26 с
21. Bartel, Erich; Surmund, Jörg; Connell, Patrick. Kocks Rotation Mill [KRM] – An innovative elongation method for seamless tube, p. 240-245. In: 52° Seminário de Laminação, Rio de Janeiro, 2015. <https://doi.org/10.5151/1983-4764-26563>
22. Copper Tube Production. Integrated systems for all requirements // SMS Group GmbH. Business Unit Forging Plants. Copper Plants. – Mönchengladbach, Germany. – 2016. – 24 p
23. Shih, Chih-Kang & Hsu, R. & Hung, Chinghua. (2002). A study on seamless tube in the planetary rolling process. *Journal of Materials Processing Technology.* 121. 273-284. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01265-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01265-1)
24. Yeong-Maw Hwang, W.M. Tsai, F.H. Tsai, I. Her. Analytical and experimental study on the spiral marks of the rolled product during three-roll planetary rolling processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 46, Issues 12–13, 2006, Pages 1555-1562. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.013>
25. Трубопрокатные станы / Вердеревский В.А., Глейберг А.З., Никитин А.С. – М.: Металлургия, 1983. – 240 с.

26. Авторское свидетельство № 835540 А1 СССР, МПК В21В 19/02, В21В 13/00, В21В 13/12. Трехвалковая клеть стана винтовой прокатки : № 2739057 : заявл. 21.03.1979 : опубл. 07.06.1981 / И. Н. Потапов, С. М. Горбатюк, Э. Н. Ларин [и др.] ; заявитель МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНА-МЕНИ ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ. – EDN FMVRIS.
27. Авторское свидетельство № 931245 А1 СССР, МПК В21В 19/02, В21В 13/12. Трехвалковая клеть стана винтовой прокатки : № 3002402 : заявл. 10.11.1980 : опубл. 30.05.1982 / Э. Н. Ларин, И. Н. Потапов, С. М. Горбатюк [и др.] ; заявитель МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ. – EDN SPНІВN.
28. Патент № 2482932 С2 Российская Федерация, МПК В21В 9/00. рабочая клеть вакуумного стана винтовой прокатки : № 2011133288/02 : заявл. 09.08.2011 : опубл. 27.05.2013 / С. М. Горбатюк, Л. М. Глухов, Е. З. Туктаров [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Общество с ограниченной ответственностью "Инжиниринг. Технологии. Материалы". – EDN ХKYROO.
29. Авторское свидетельство № 1329850 А1 СССР, МПК В21В 19/02. Способ настройки стана винтовой прокатки : № 3908937 : заявл. 10.06.1986 : опубл. 15.08.1987 / И. Н. Потапов, С. М. Горбатюк, Э. Н. Ларин [и др.] ; заявитель МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ. – EDN EOCQZB.
30. Авторское свидетельство № 1359023 А1 СССР, МПК В21В 9/00, В21В 19/00. Вакуумный прокатный стан : № 3891963 : заявл. 11.05.1985 : опубл. 15.12.1987 / П. М. Финагин, И. Н. Потапов, Э. Н. Ларин [и др.] ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я В-2869. – EDN SMSKUZ.
31. Авторское свидетельство № 1683833 А1 СССР, МПК В21В 19/02, В21В 19/04. Способ исследования процесса поперечно-винтовой прокатки и устройство для его осуществления : № 4745489 : заявл. 03.10.1989 : опубл. 15.10.1991 / И. Н. Потапов, А. Е. Доронькин, С. М. Горбатюк [и др.] ; заявитель МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ. – EDN ІEOOMV.
32. Галкин С. П. Технология и мини-станы радиально-сдвиговой прокатки - оптимальная техника для создания бережливого производства / С. П. Галкин // Сталь. – 2014. – № 1. – С. 39-42. – EDN RWGMNJ.
33. Ресурсосберегающая технология производства круглого сортового проката из бывших в употреблении осей подвижного железнодорожного состава / С. П. Галкин, Б. А.

Романцев, Д. С. Та, Ю. В. Гамин // Черные металлы. – 2018. – № 4. – С. 21-27. – EDN XMREJV.

34. Разработка технологий и проектирование оборудования ОМД. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.istok.su/development.html> Дата обращения: 11.01.2021

35. Галкин С.П., Гамин Ю.В., Алещенко А.С., Романцев Б.А. Современное развитие элементов теории, технологии и мини-станов радиально-сдвиговой прокатки. Черные металлы. 2021;(12):51–58. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.12.09>

36. Галкин С. П. Реализация инновационного потенциала универсального способа радиально-сдвиговой прокатки / С. П. Галкин, Б. А. Романцев, Е. А. Харитонов // Черные металлы. – 2015. – № 1(997). – С. 23-28. – EDN TIREUB.

37. Сравнительный анализ вклада текстуры в уровень механических свойств мелкозернистых магниевых сплавов после равноканального углового прессования и радиально-сдвиговой прокатки / В. Н. Серебряный, С. В. Добаткин, Ю. З. Эстрин [и др.] // Технология легких сплавов. – 2015. – № 2. – С. 112-118. – EDN VKABFH.

38. Влияние радиально-сдвиговой прокатки на формирование структуры и механических свойств алюмоматричных композиционных сплавов эвтектического типа Al-Ni и Al-Ca / Т. К. Акопян, А. С. Алещенко, Н. А. Белов, С. П. Галкин // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119, № 3. – С. 254-263. – DOI 10.7868/S0015323018030051. – EDN YSWDMS.

39. Изучение влияния режимов радиально-сдвиговой прокатки на температурно-деформационные условия процесса обработки алюминия АД0 / Ю. В. Гамин, А. Н. Кошмин, А. П. Долбачев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2020. – № 5. – С. 70-83. – DOI 10.17073/0021-3438-2020-5-70-83. – EDN TDYCLA.

40. Влияние режимов радиально-сдвиговой прокатки на расходный коэффициент и свойства прутков из алюминиевого сплава Д16 / Ю. В. Гамин, С. П. Галкин, Б. А. Романцев [и др.] // Металлург. – 2021. – № 6. – С. 56-63. – DOI 10.52351/00260827\_2021\_06\_56. – EDN LRUJOO.

41. Анализ температурно-деформационных условий прокатки алюминиевого сплава Al-Mg-Sc на основе моделирования методом конечных элементов / Ю. В. Гамин, С. П. Галкин, С. З. Нгуен, Т. К. Акопян // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 57-67. – DOI 10.17073/0021-3438-2022-3-57-67. – EDN VHEAXI.

42. Галкин, С. П. Разработка и опытно-промышленное опробование технологии получения деформированных прутков сплава Д16(Т) из непрерывно-литых заготовок малого диаметра с низкими коэффициентами вытяжки / С. П. Галкин, А. С. Алещенко, Ю.

- В. Гамин // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 71-79. – DOI 10.17073/0021-3438-2022-2-71-79. – EDN UPNIFO.
43. Влияние предварительной деформации непрерывнолитых заготовок радиально-сдвиговой прокаткой на структуру и свойства горячекатаных труб из хромсодержащих сталей / С. П. Галкин, А. С. Алещенко, Б. А. Романцев [и др.] // Металлург. – 2021. – № 2. – С. 54-61. – EDN GLJJDM.
44. Радиально-сдвиговая прокатка прутков титанового сплава BT-8 с регламентированной структурой из слитков малого диаметра (не более 200 мм) / Б. В. Карпов, П. В. Патрин, С. П. Галкин [и др.] // Металлург. – 2017. – № 10. – С. 54-59. – EDN ZQQDXB.
45. Тестирование технологии радиально-сдвиговой прокатки и предпроектный выбор мини-станов для гибкого производства титановых прутков малых сечений в условиях АО ЧМЗ / Д. А. Негодин, С. П. Галкин, Е. А. Харитонов [и др.] // Металлург. – 2018. – № 11. – С. 40-46. – EDN YPEIOL.
46. Сравнительное исследование горячей радиально-сдвиговой прокатки заготовок из сверхупругого сплава системы Ti-Zr-Nb и серийного сплава BT6 методом QForm-моделирования / Т. Д. Суан, В. А. Шереметьев, В. С. Комаров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2020. – № 6. – С. 32-43. – DOI 10.17073/0021-3438-2020-6-32-43. – EDN MHQTTH.
47. Влияние комбинации радиально-сдвиговой прокатки и ротационной ковки на напряженно-деформированное состояние прутковой заготовки малого диаметра из титановых сплавов / Т. Д. Суан, В. А. Шереметьев, А. А. Кудряшова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2020. – № 2. – С. 22-31. – DOI 10.17073/0021-3438-2020-2-22-31. – EDN AYYFFY.
48. Моделирование и экспериментальная оценка условий кольцевого разрушения при горячей радиально-сдвиговой прокатке / С. П. Галкин, С. А. Стебунов, А. С. Алещенко [и др.] // Металлург. – 2020. – № 3. – С. 64-70. – EDN SKRSRI.
49. Naizabekov, A.B., Lezhnev, S.N., Arbuz, A.S. The Effect of Radial-Shear Rolling on the Microstructure and Mechanical Properties of Technical Titanium. *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.299.565>.
50. Gamin Yu.V., Galkin S.P., Nguyen X.D., Akopyan T.K. Analysis of temperature-deformation conditions for rolling aluminum alloy Al–Mg–Sc based on FEM modeling, *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2022. Vol.3 pp. 57-67. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-3-57-67>

51. Diez M., Kim H.-E., Serebryany V., Dobatkin S., Estrin Y. Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling. *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 612. pp. 287-292. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.061>.
52. Arbuz A, Kawalek A, Ozhmegov K, Dyja H, Panin E, Lepsibayev A, Sultanbekov S, Shamenova R. Using of Radial-Shear Rolling to Improve the Structure and Radiation Resistance of Zirconium-Based Alloys. *Materials*. 2020; 13(19):4306. <https://doi.org/10.3390/ma13194306>.
53. Галкин С.П., Гамин Ю.В., Кин Т.Ю., Костин С.А. Экспериментальное опробование радиально-сдвиговой прокатки для получения деформированного сплава системы Co – Cr – Mo. // Чёрные металлы. – 2023. – №9. – С. 47-53. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.09.08>.
54. Sheremetyev, V., Kudryashova, A., Cheverikin, V., Korotitskiy, A., Galkin, S., Prokoshkin, S., Brailovski, V. Hot radial shear rolling and rotary forging of metastable beta Ti-18Zr-14Nb (at. %) alloy for bone implants: Microstructure, texture and functional properties. *Journal of Alloys and Compounds*. Volume 800, 5 September 2019, Pages 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.041>.
55. Galkin S.P., Kin T.Yu., Gamin Yu.V., Aleshchenko A.S., Karpov B.V. Review of scientific-applied research and industrial application of radial shear rolling technology. *CIS Iron and Steel Review*. 2024. T. 27. C. 35-47. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2024.01.06>.
56. Iskhakov R.V., Gamin Y.V., Kadach M.V., Budnikov A.S. (2020) Development of radial-shear rolling mill special stands for continuous cast billets deformation. Paper presented at the IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 966(1) doi: 10.1088/1757-899X/966/1/012075
57. Галкин С.П., Алещенко А.С., Романцев Б.А., Гамин Ю.В., Исахаков Р.В. Влияние предварительной деформации непрерывнолитых заготовок радиально-сдвиговой прокаткой на структуру и свойства горячекатаных труб из хромосодержащих сталей. *Металлург*. 2021. № 2. С. 54-61
58. Машины и агрегаты трубного производства: Учебное пособие для вузов / А.П. Коликов, В.П. Романенко, С.В. Самусев и др. – М.: Изд. Дом МИСиС, 1998. – 536 с.
59. Обработка металлов давлением: Учебник / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2008. – 960 с.
60. Рабочая клеть трубопрокатного стана поперечно-винтовой прокатки: а. с. 205790 СССР: В21В 19/02 П.М. Финагин, И.К. Тартаковский, П.И. Ермолаев (СССР). – № 1021097/22-2; заявл. 26.07.1965; опубл. 02.12.1967, Бюл. №12. – 4 с.
61. Трёхвалковая рабочая клеть для раскатки, обкатки и калибровки труб: а. с. 152449 СССР: В21В 31/24 К.С. Швецов, А.И. Пятунин (СССР). – № 770699/22-2; заявл. 28.03.1962; опубл. 10.12.1973, Бюл. №47. – 4 с.

62. Трёхвалковая клеть стана поперечно-винтовой прокатки: пат. 2338607 Рос. Федерация: МПК В21В 31/00 И.К. Тартаковский, В.С. Зарудный, Б.И. Тартаковский, В.В. Рассказов, В.В. Бедняков, В.Г. Бородин, Е.Н. Фоминых, А.В. Колобков; заявитель и патентообладатель ОАО «Электростальский завод тяжёлого машиностроения» – 2007102758/02; заявл. 14.01.2007; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32 – 8 с.
63. Патент № 2056956 РФ, МПК В21В19/04. Трёхвалковый калибр и способ его настройки / Гольдштейн И.Л., Терентьев Д.В., Финагин П.М. и др. – заявл. 28.07.1992 г.
64. Есаулов Г.А., Гольдштейн И.Л. Особенности геометрии станов винтовой прокатки, *Металлургическая и горнодобывающая промышленность*, 2000, с. 289-290.
65. Онучин А.Б., Романцев Б.А., Галкин С.П., Гончарук А.В. Министаны нового типа // *Достижения учёных XXI века*. – 2010. – №6. – С. 38-40.
66. Алещенко А.С., Исхаков Р.В., Галкин С.П., Гамин Ю.В., Кадач М.В. Технология и клеть радиально-сдвиговой прокатки специальной конструкции для предварительного обжатия непрерывнолитых заготовок в условиях ТПА-160 АО «Первоуральский новотрубный завод» при повышенных углах подачи валков // *Чёрные металлы*. – 2024. – №11. – С. 45-52.
67. Bodein Y, Rose B, Caillaud E. Explicit reference modeling methodology in parametric CAD system. *Comput Ind* 2014;65:136–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2013.08.004>
68. Camba J, Contero M, Company P. Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability. *Comput Des* 2016;63:18–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2016.01.003>
69. Landers DM, Khurana P. Horizontally-structured CAD/CAM modeling for virtual concurrent product and process design. 2004;(75).
70. Aritz Aranburu, Josu Cotillas, Daniel Justel, Manuel Contero, Jorge D. Camba, How Does the Modeling Strategy Influence Design Optimization and the Automatic Generation of Parametric Geometry Variations?, *Computer-Aided Design*, Volume 151, 2022, 103364, ISSN 0010-4485, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103364>.
71. Resilient Modeling Strategy, RMS. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.learnrms.com/>. Дата обращения: 22.12.2022
72. Gebhard R. 122 - A resilient modeling strategy. In: *Solid edge university 2013*. Siemens; 2013.
73. Галкин С.П., Фадеев В.А., Гусак А.Ю. Методика виртуальных пережимов для расчета мини-станов радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки. *Производство проката*. 2016; (2): 27–35. EDN: VMĐTQX <https://elibrary.ru/VMĐTQX>

74. Галкин С.П., Фадеев В.А., Гусак А.Ю. Сопоставительный анализ геометрии мини-станов радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки. Производство проката. 2015; (12): 19–25. EDN: VDGOJL <https://elibrary.ru/VDGOJL>
75. Геометрия радиально-сдвиговой (винтовой) прокатки на плоскости с решением обратной задачи / С. П. Галкин, В. А. Фадеев, Р. В. Исхаков [и др.] // Прокатное производство. Приложение к журналу "Технология металлов". – 2024. – № 22. – С. 1-9. – DOI 10.31044/1684-2499-2024-0-22-1-9. – EDN TXMTRU.
76. Миронов Ю.М. Геометрические параметры процесса кривой прокатки. Производство труб. 1962; 6: 37–46.
77. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. М.: Metallurgy; 1971: 386.
78. Будников А.С. Совершенствование процессов раскатки и калибрования труб в трёхвалковых станах винтовой прокатки: дисс. канд. техн. наук. Москва, 2020: 147.
79. Галкин С.П., Харитонов Е.А., Романенко В.П. Радиально-сдвиговая прокатка – новый высокоэффективный способ обработки давлением. Прогрессивные технологии ОМД. Учебно-методическое пособие – М.: ИРИАС, 2009. 600 с. С. 293-302.
80. Galkin S.P., Kin T.Yu., Gamin Yu.V., Aleshchenko A.S., Karpov B.V. Review of scientific-applied research and industrial application of radial shear rolling technology. CIS Iron and Steel Review. Vol. 27 (2024), pp. 35-47  
<https://doi.org/10.17580/cisisr.2024.01.06>
81. Гамин Ю.В., Троицкий Д.В., Галкин С.П. [и др.] Алгоритм автоматизированного параметрического проектирования трехвалковой клетки радиально-сдвиговой прокатки. Сталь. – 2024. – № 11. – С. 25-33. – EDN KGCCIK.
82. Троицкий Д.В., Гамин Ю.В., Галкин С.П., Будников А.С. Параметрическая модель трехвалкового узла мини-стана радиально-сдвиговой прокатки. Известия вузов. Черная металлургия. 2023;66(3):376–386. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-376-386>
83. Долганина Н.Ю. Нейросетевая модель для распознавания дефектов в подшипнике на основе анализа данных конечно-элементного моделирования работы подшипника / Н.Ю. Долганина, С.А. Иванов // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2023): Короткие статьи и описания плакатов. Материалы XVII всероссийской научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 28–30 марта 2023 года. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2023. – С. 124-132. <https://elibrary.ru/SSQAQE>
84. Будников А.С. Исследование деформационно-силовых параметров процесса раскатки и безоправочной винтовой прокатки труб на трехвалковых станах / А.С. Будников, Е.А. Харитонов, Р.В. Исхаков // Черные металлы. – 2021. – № 4. – С. 20-24. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.04.04> <https://elibrary.ru/CPZVER>

85. Горячая прокатка и прессование труб / Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1972. – 591 с.
86. Технология и оборудование трубного производства: учебник для вузов / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
87. Технология трубного производства / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
88. Галкин С.П. Теория и технология стационарной винтовой прокатки заготовок и прутков малопластичных сталей и сплавов: автореф. дисс. докт. техн. наук. – М.: МИСиС, 1998. – 41 с.
89. Никулин А.Н., Стрелецкий В.В. Деформационное воздействие винтовой прокатки на непрерывнолитой металл // *Металлург.* – 2005. – №3. – С. 41-44.
90. Трубное производство: учебник / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: Издательский Дом МИСИС, 2011. – 970 с.
91. Д.Б. Модернизация механизма быстрого отжима валков прокатной клетки дуо стана 2800 АО "Уральская Сталь" / Д.Б. Ефремов, В.М. Степанов, О.Н. Чиченева // *Сталь.* – 2020. – № 8. – С. 44-47. <https://elibrary.ru/QSUUOD>
92. Малотоннажные листовые станы холодной прокатки АО АХК "ВНИИМЕТМАШ" / А.А. Боровик, Я.Л. Кац, Л.А. Клячко, Б.А. Сивак // *Металлург.* – 2021. – № 12. – С. 86-92. [https://doi.org/10.52351/00260827\\_2021\\_12\\_86](https://doi.org/10.52351/00260827_2021_12_86) <https://elibrary.ru/AYHUYD>
93. Автоматизированная линия винтовой прокатки полых заготовок малого диаметра / Б.А. Романцев, Ю.В. Гамин, А.В. Гончарук, А.С. Алещенко // *Механическое оборудование металлургических заводов.* – 2017. – № 2(9). – С. 9-17. <https://elibrary.ru/YLFKWC>
94. Шаталов Р. Л. Влияние неравномерности температуры на твердость, структуру и дефекты прошивной оправки трехвалкового винтового прокатного стана 30-80 / Р. Л. Шаталов, Е. Е. Загоскин, В. А. Медведев // *Черные металлы.* – 2023. – № 3. – С. 46-51. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.08> <https://elibrary.ru/JYNHUR>
95. Shatalov R.L. Medvedev V.A. Effect of Deformed Workpiece Temperature Inhomogeneity on Mechanical Properties of Thin-Walled Steel Vessels During Treatment in a Rolling and Pressing Line // *Metallurgist*, 2019., 63(1-2), pp. 176-182. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00807-w>
96. Shatalov R.L., Medvedev V.A., Zagoskin E.E. Determination of mechanical properties of steel thinwalled vessels by hardness after hot screw rolling with subsequent stamping and quenching. *Chernye Metally*, 2019, (7), pp. 36-40 <https://elibrary.ru/KIPOQO>

97. Shatalov R.L., Shelest A.E. and Medvedev V.A.. Electromagnetic Device for Nondestructive Control of the Mechanical Properties of Thin-Walled Steel Vessels. *Russian Metallurgy (Metally)*, Vol. 2020, No. 3, pp. 259–264. <https://doi.org/10.1134/S003602952003012X>
98. ГОСТ 10177-82 – 1083. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба упорная. Профиль и основные размеры.
99. Сурков И.А. Восстановление поверхностей станин рабочей клетки «кварто» стана 5000 под плиты скольжения нижнего опорного вала / И.А. Сурков // *Современные материалы и технологии восстановления и упрочнения деталей промышленного оборудования: Сборник материалов первой международной научно-практической конференции, Старый Оскол, 16–17 сентября 2021 года.* – Старый Оскол: Старооскольский технологический институт (филиал) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 2021. – С. 86-91. <https://elibrary.ru/SLLMPC>.
100. Электрооборудование прошивных и раскатных станов винтовой прокатки. Учебное пособие / А.С. Михайлов, С.П. Галкин, И.И. Лубе, В.В. Гуреев. – Выкса, Выксунский филиал НИТУ «МИСИС», 2010. – 74 с.
101. ГОСТ 22411-77 «Прутки из сплавов горячекатаные и кованные. Сортамент».
102. ГОСТ 26492-85 «Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические условия».
103. How to select Rolling Mill Rolls: Materials, Hardness, and Failure Modes. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sme-group.com/blog/how-to-select-rolling-mill-rolls-materials-hardness-and-failure-modes> Дата обращения: 13.02.2026

## АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ИСТОК МЛ»

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Исток МЛ»

Л.Г. Дмитриева

« 17 » 03 2026 г.



## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Троицкого Даниила Владимировича «Разработка алгоритма параметрического проектирования трёхвалковых клеток винтовой прокатки с применением методов компьютерного инжиниринга и автоматизированных систем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением.

Настоящий Акт составлен о том, что ряд научно-технических положений, разработанных в диссертационной работе Троицкого Д.В., имеют теоретическое и практическое значение для повышения эффективности процесса проектирования трехвалковых клеток винтовой прокатки. В частности, в АО «Исток МЛ» используются:

- алгоритм параметрического проектирования и программно-расчетный модуль (ПРМ) для проектирования и расчета параметров трехвалковых клеток винтовой прокатки;

- трехмерные модели нескольких типоразмеров клеток («10-30», «30-60», «60-160») и система формирования комплекта рабочих чертежей на основе современных методов компьютерного инжиниринга и автоматизированных систем проектирования (CAD, CAE, FEM).


Применение этих решений позволило существенно снизить трудоемкость этапов эскизного и рабочего проектирования и сократить общее время разработки.

Инженер

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to M.V. Kadach, is written over the 'Инженер' (Engineer) text.

М.В. Кадач

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2


 УТВЕРЖДАЮ  
 Директор Института технологий  
 НИТУ МИСИС  
 А.Я. Травянов  
 « 11 » 09 2025 г.

## АКТ

**о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Троицкого Даниила Владимировича в учебный процесс на кафедре обработки металлов давлением (ОМД) НИТУ МИСИС**

Настоящий акт составлен о том, что в учебном процессе на кафедре ОМД НИТУ МИСИС используются результаты диссертационной работы Троицкого Д.В. на тему «Разработка алгоритма параметрического проектирования трёхвалковых клетей винтовой прокатки с применением методов компьютерного инжиниринга и автоматизированных систем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением.

Представленные в диссертации расчеты и алгоритм проектирования оборудования трехвалковой клетки винтовой прокатки, результаты моделирования методом конечных элементов статической прочности рабочей клетки, а также рекомендации по параметрическому проектированию элементов и узлов рабочей клетки стана использованы в учебном процессе на кафедре ОМД в рамках курсов «Проектирование современных производств ОМД», «Деформационные комплексы и модули» и «Компьютерное проектирование процессов и технологий ОМД». Материалы используются при выполнении лабораторных работ, практических занятий, подготовке курсовых работ и проектов студентами бакалавриата, обучающимися по направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» и 22.03.02 «Металлургия».

Результаты работы рассмотрены и рекомендованы к внедрению на заседании расширенного научного семинара кафедры ОМД от «09» сентября 2025 года (протокол № 1).

Начало использования объекта внедрения – сентябрь 2025 года.

Зав. кафедрой ОМД

Ученый секретарь кафедры ОМД

Научный руководитель, доцент

А.С. Алещенко

Т.Ю. Сидорова

Ю.В. Гамин

