

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Гамин Юрий Владимирович

Москва – 2026

Общая характеристика работы

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 трехвалковой клетки винтовой прокатки с применением современных методов инжиниринга и автоматизированного проектирования.

Для достижения цели в работе поставлены следующие **основные задачи**:

☐ проведение анализа существующих конструкций клетей 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 прочностных 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 клетей 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.

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» (<http://antiplagiat.ru>).

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 и 8 таблиц и 2 приложения.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели задачи исследования, а также научная и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен литературный обзор современных методов инжиниринга металлургического оборудования и проведён анализ конструктивных особенностей трёхвалковых клетей винтовой прокатки.

Показано, что современное прокатное оборудование представляет собой сложные технические системы, включающие большое количество взаимосвязанных узлов и деталей. Проектирование такого оборудования требует многоэтапного подхода и активного применения систем автоматизированного проектирования. Ключевой тенденцией развития цифрового инжиниринга является переход к комплексной автоматизации расчётов, широкому использованию трёхмерного моделирования и снижению вероятности проектных ошибок.

Рассмотрен метод параметрического моделирования как один из базовых инструментов цифрового проектирования. Показано, что применение параметризации существенно снижает трудоёмкость проектирования и повышает гибкость конструкторских решений.

Проведён анализ типовой конструкции трёхвалковых станов и выявлены основные конструктивные различия клетей, заключающиеся в способах регулирования угла подачи, сведения и разведения валков, технологии перевалки, организации приводов нажимных устройств.

Показано, что увеличение числа подвижных соединений приводит к снижению жёсткости клетки, росту зазоров и ухудшению точности настройки очага деформации. В качестве базового направления для дальнейших исследований обосновано использование концепции министанов с блочной компоновкой и конструктивно заданными углами подачи и раскатки, а также применение масштабируемого модульного подхода к проектированию от очага деформации к общей компоновке стана.

Во второй главе обоснован выбор метода автоматизированного проектирования, программной среды и методологической базы, а также

разработана и автоматизирована методика построения валкового узла от очага деформации.

Проектирование министанов винтовой прокатки характеризуется высокой трудоёмкостью и зависит от широкого спектра исходных требований заказчика (сортамент продукции, размеры заготовок, производительность, габариты оборудования). Обоснована необходимость применения современных средств автоматизированного проектирования для сокращения сроков разработки и снижения инженерных затрат.

Обоснован выбор метода параметризации как базового инструмента автоматизированного проектирования, обеспечивающего адаптивное перестроение модели при изменении исходных данных. Современные CAD-системы позволяют формировать статические, расчётные и ссылочные параметры, реализовывать ассоциативные связи типа parent-child и обеспечивать повторное использование геометрии. Создаваемая модель должна проходить проверки на корректность сборки, устойчивость при варьировании параметров и прочностную работоспособность.

В качестве программной среды реализации алгоритма выбрана система Autodesk Inventor, обладающая необходимыми средствами параметризации, ассоциативного моделирования и автоматической генерации конструкторской документации.

Проведён анализ и выбор методологии параметрического моделирования: горизонтальное моделирование, моделирование с явными ссылками и устойчивое моделирование.

Методология горизонтального моделирования, несмотря на повышение устойчивости, противоречит логике параметрического проектирования и требует значительных трудозатрат, поэтому признана ограниченно применимой для проектируемой клетки. Вместе с тем рекомендовано частичное использование её принципов при привязке элементов к базовым плоскостям и системе координат.

В качестве основной принята методология моделирования с явными ссылками (ERM), предусматривающая замену зависимостей от изменяемой геометрии на ссылки на вспомогательные объекты. Её применение позволяет снизить количество критических зависимостей и повысить устойчивость модели. Предусмотрено функциональное разбиение модели на узлы (валковый узел, нажимное устройство, уравнивающее устройство и др.) с последующей связью через пользовательские параметры.

Дополнительно внедрены принципы методологии устойчивого моделирования, включающие структурирование древовидной модели, унификацию наименований, группировку элементов и проведение стресс-тестов путём варьирования ключевых параметров. Сформирована иерархия модели: деталь - узел - сборка узлов - общая сборка клетки.

Разработана методика построения валкового узла от очага деформации на основе методики виртуальных пережимов ОМД МИСИС, где используются инвариантные геометрические соотношения станов винтовой прокатки. Это позволяет определить профиль валка по заданному профилю очага деформации.

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 известная формула (1):

$$D_B^{max} = \frac{d_k^{min} - \frac{\Delta}{\cos\varphi}}{k}, \quad (1)$$

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

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

Δ – зазор между соседними валками, мм;

φ – 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 β , раскатки δ , и может быть определен по формуле (2):

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

Приведён пример расчёта калибровки валка для типоразмера стана 30–70, подтверждающий возможность получения параметров валка по ограниченному набору исходных данных. Увеличение числа расчётных сечений повышает точность профилирования валка и позволяет формировать таблицы калибровки для последующей обработки на станках с ЧПУ.

Выполнена автоматизация методики виртуальных пережимов в САД-среде. Расчётные зависимости реализованы через систему пользовательских параметров (таблица 1), сгруппированных по функциональному назначению (X - исходные данные, A - технологический и геометрический пережимы, B и C - виртуальные пережимы входа и выхода). При корректной параметризации 3D-эскиз очага деформации имеет нулевую степень свободы и однозначно определяется исходными данными. Для проверки корректности построенной модели используются параметры X1, X2, A2, B5, B6, C5 и C7, для которых справедливо отношение (3):

$$\cos(X1) * \cos(X2) = \cos(B5) * \cos(B6) = \cos(C5) * \cos(C7) = \cos(A2) \quad (3)$$

Таблица 1 - Кодирование основных параметров очага деформации

Обознач.	Название параметра	Формула в Autodesk Inventor	Формула
Исходные (основные) параметры			
X1	Угол подачи β , градусы	Явное значение (передается из программно-расчетного модуля (ПРМ))	Явное значение (20*)
X2	Угол раскатки δ , 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)	$X4 = \frac{X5}{\sqrt{\mu_{max}}}$

			μ_{\max} – максимальный коэффициент вытяжки за проход.
X5	Радиус r1, мм	Явное значение (передается из ПРМ)	Явное значение (35*)
X6	Радиус r2, мм	Явное значение (рассчитано и передается из ПРМ)	$X6 = X4 + 1,5$
*пример выбранных значений параметров для типоразмера клетки 30–70			
Параметры технологического и геометрического пережимов			
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 γ , градусы	$\arccos(\cos(x1) * \cos(x2))$	$\cos A2 = \cos X1 * \cos X2$
A3	Длина общего перпендикуляра E, мм	$a1 * \sin(x1) * \cos(x2) / \sin(a2)$	$A3 = A1 \frac{\sin X1 * \cos X2}{\sin A2}$
A4	Расстояние L между технологическим и геометрическим пережимами по оси прокатки, мм	$a1 * \sin(x2) / (\sin(a2) * \sin(a2))$	$A4 = A1 \frac{\sin X2}{A2}$
A5	Расстояния I между технологическим пережимами по оси прокатки, мм	$a4 * \cos(a2)$	$A5 = A4 * \cos A2$
A6	Расстояния LR от центра сечения валка до геометрического пережима, мм	$a4 - x3 * \tan(x2)$	$A6 = A4 - X3 * \tan X2$
Параметры виртуального пережима в сечении 1 входа в очаг деформации			
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	$\sqrt{(b1 * \tan(a2))^2 + (a3)^2}$	$B3 = \sqrt{(B1 * \tan A2)^2 + A3^2}$
B4	Расстояние PN1 между осью прокатки и осью валка перпендикулярно к оси валка, мм	$\sqrt{(b1 * \sin(a2))^2 + (a3)^2}$	$B4 = \sqrt{(B1 * \sin A2)^2 + A3^2}$
B5	Угол раскатки δ_1 , градусы	$\arccos(b4 / b3)$	$\cos B5 = \frac{B4}{B3}$
B6	Угол подачи β_1 , градусы	$\arctan(a3 * \tan(a2) / b3)$	$\tan B6 = \frac{A3 * \tan A2}{B3}$
B7	Радиус валка R1, мм	$\cos(b5) * (b3 - x5)$	$B7 = \cos B5 * (B3 - X5)$
B8	Расстояние LR1 от центра сечения валка до геометрического пережима, мм	$b2 - b7 * \tan(b5)$	$B8 = B2 - B7 * \tan B5$
B9	Расстояние XR1 от центра сечения валка до центра сечения валка технологического пережима, мм	$b8 - a6$	$B9 = B8 - A6$
Параметры виртуального пережима в сечении 2 выхода из очага деформации			
C1	Расстояние I2 до геометрического пережима по оси прокатки	$a5 + x3 * -1 \text{ бр}$	$C1 = A5 - X3$
C2	Расстояние L2 до геометрического пережима по оси валка	$c1 / \cos(a2)$	$C2 = \frac{C1}{\cos A2}$
C3	Расстояние P2 между осью прокатки и осью валка перпендикулярно к оси прокатки	$\sqrt{(c1 * \tan(a2))^2 + (a3)^2}$	$C3 = \sqrt{(C1 * \tan A2)^2 + A3^2}$
C4	Расстояние PN2 между осью прокатки и осью валка перпендикулярно к оси валка	$\sqrt{(c1 * \sin(a2))^2 + (a3)^2}$	$C4 = \sqrt{(C1 * \sin A2)^2 + A3^2}$

C5	Угол раскатки δ_2	$\arccos(c_4 / c_3)$	$\cos C5 = \frac{C4}{C3}$
C6	Угол подачи β_2	$\arctan(a_3 \cdot \tan(a_2) / c_3)$	$\tan C6 = \frac{A3 \cdot \tan A2}{C3}$
C7	Радиус валка R2	$\cos(c_5) \cdot (c_3 - x_6)$	$C7 = \cos C5 \cdot (C3 - X6)$
C8	Расстояние XR2 от центра сечения валка до центра сечения валка технологического пережима	$c_2 - c_7 \cdot \tan(c_5)$	$C8 = C2 - C7 \cdot \tan C5$
C9	Расстояние XR2 от центра сечения валка до центра сечения валка технологического пережима	$c_8 - a_6$	$C9 = C8 - A6$

Разработана адаптивная геометрическая схема взаимного положения осей валка и прокатки (рисунок 1) и получены параметрические модели бочки валка для различных углов раскатки (рисунок 2). Известно, что рациональная область применимости модели для трёхвалковых станков при углах раскатки $\delta = 5\text{--}15^\circ$ и углах подачи $\beta = 10\text{--}25^\circ$.

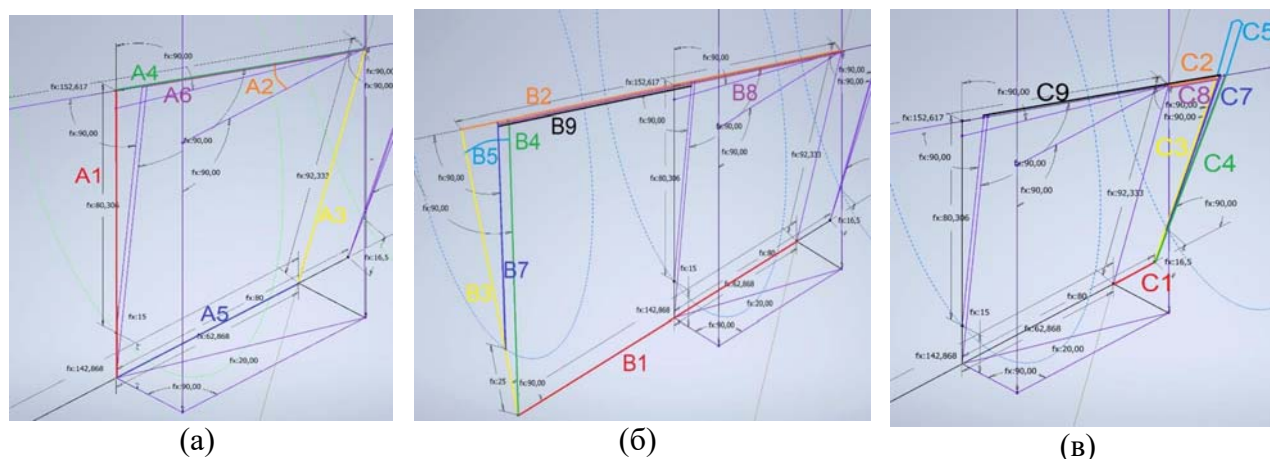


Рисунок 1 – Параметры адаптивной схемы, используемые для построения геометрических пережимов: (а) – параметры А, (б) – параметры В, (в) – параметры С.

Применение параметрического подхода в сочетании с методикой виртуальных пережимов обеспечивает автоматизированное построение очага деформации и калибровки валков по заданным технологическим параметрам. Выбранная комбинация методологий моделирования обеспечивает требуемую гибкость, устойчивость и повторное использование разработанной модели, что

В третьей главе разработан алгоритм автоматизированного проектирования трёхвалковой клетки винтовой прокатки и обоснованы исходные допущения, параметры и конструктивные решения, обеспечивающие устойчивую параметрическую модель.

На начальном этапе определены ключевые ограничения проектирования. Базовым параметром принят диаметр рабочих валков, для которого использовано двухстороннее ограничение отношения диаметра валка к диаметру проката (4):

$$1,9 - 2,0 \leq \frac{D_B}{d_n} \leq 5,6 - 5,7. \quad (4)$$

Соблюдение данного условия определяет рациональность очага деформации и допустимый суммарный коэффициент вытяжки. При этом возможное противоречие между прочностью валка и геометрическими ограничениями сведения на минимальный калибр решается с помощью корректирующих мер: снижение обжатия или сужение размерного диапазона прутков. Для оперативной оценки параметров разработана экранная подсказка в программно-расчетном модуле (ПРМ), автоматически контролирующая соблюдение рационального условия.

Определены факторы, влияющие на конструкцию клетки: сортамент продукции, требования к точности и качеству поверхности, производительность, безопасность эксплуатации и экономичность изготовления. В результате сформирован общий алгоритм проектирования, основанный на принципах параметризации, итерационности и модульности (рисунок 3).

Принята концепция проектирования «снизу-вверх» - от очага деформации к станине. Архитектура алгоритма (рисунок 4) включает расчётный блок (реализованный в Excel-ПРМ) и проектный блок в Autodesk Inventor, между которыми обеспечена автоматическая передача данных.

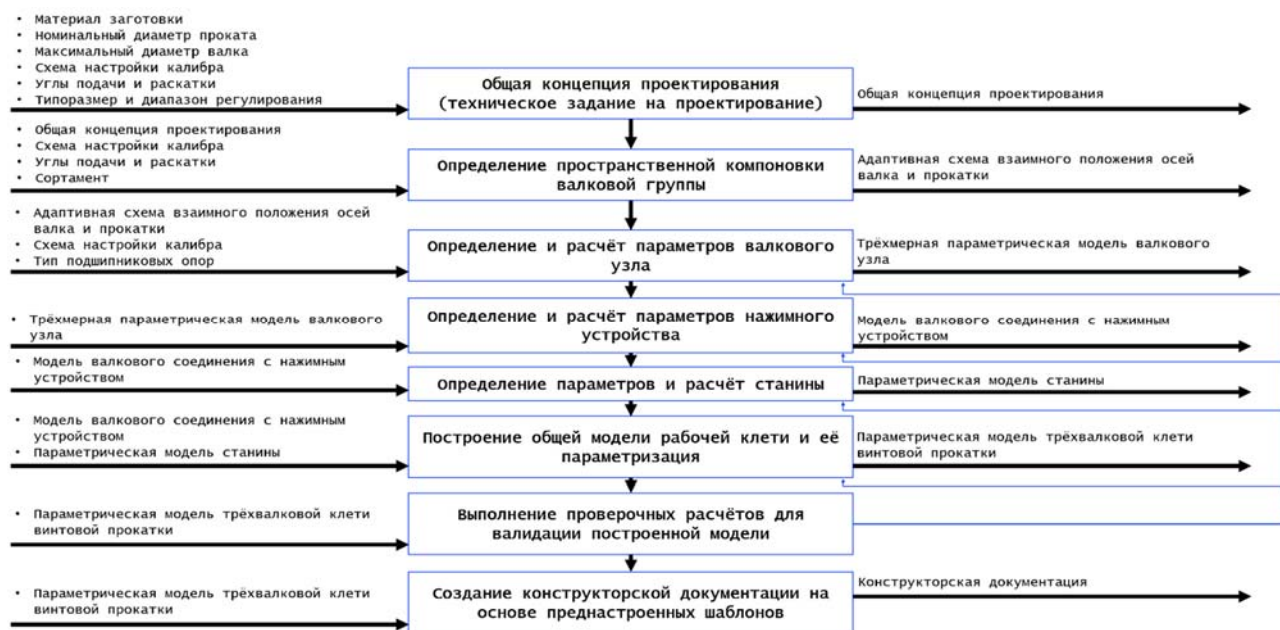


Рисунок 3 – Общая схема разработанного алгоритма проектирования трёхвалковой клетки винтовой прокатки.

В алгоритме реализованы ассоциативные связи, кодирование параметров и стресс-тестирование устойчивости модели. На этапе формирования общей концепции проектирования определяются исходные параметры: схема расположения валков, углы подачи и раскатки, размерный диапазон диаметров проката, тип привода и нажимного устройства, а также предварительная производительность. Для удобства работы разработан Excel ПРМ ввода данных и система кодирования параметров.

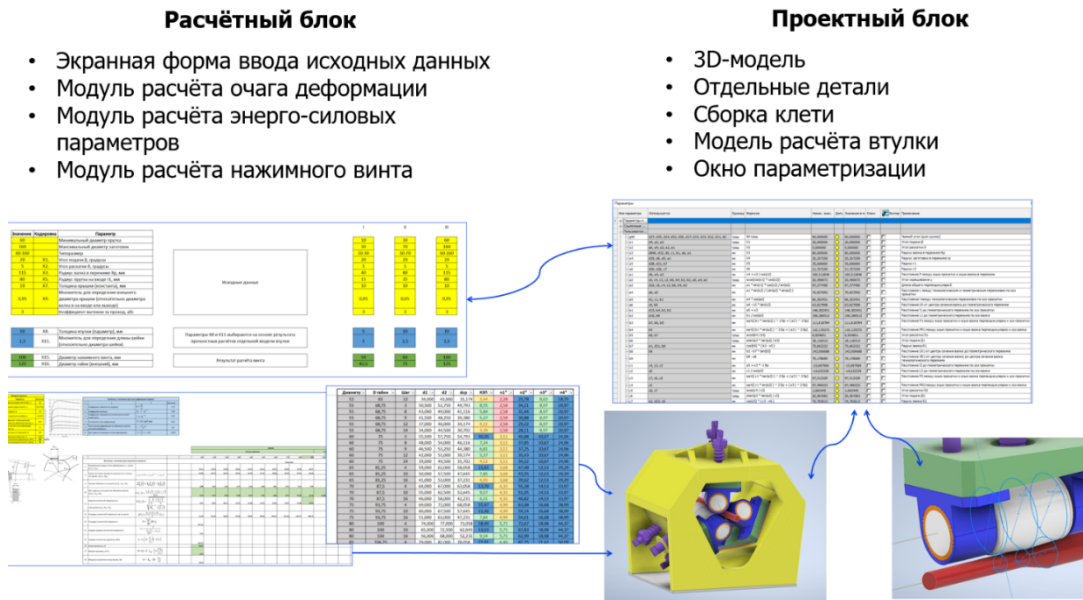


Рисунок 4 – Обобщенная схема архитектуры работы алгоритма

Выполнена разработка параметрической модели валкового узла. Обоснован выбор радиальной схемы настройки валков как наиболее рациональной для модульного и параметрического построения. Разработаны зависимости размеров и формы для расчёта шеек валка, втулок, подушек и кассеты с использованием закодированных параметров (таблица 2). Геометрия валкового узла строится от торцов бочки валка, что обеспечивает соблюдение габаритных ограничений при перестроении модели.

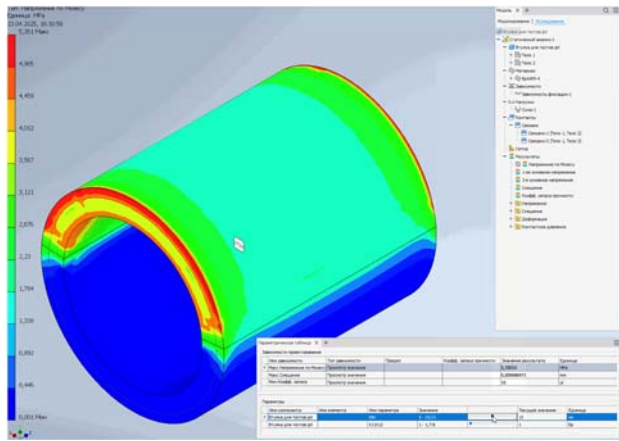
Таблица 2 – Кодирование параметров для определения шеек валка, втулок, подушек и кассеты (на примере типоразмера 30-70).

Обознач.	Название параметра	Формула в Autodesk Inventor	Формула
Дополнительные исходные параметры для определения шеек валка, втулок, подушек и кассеты			
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*)

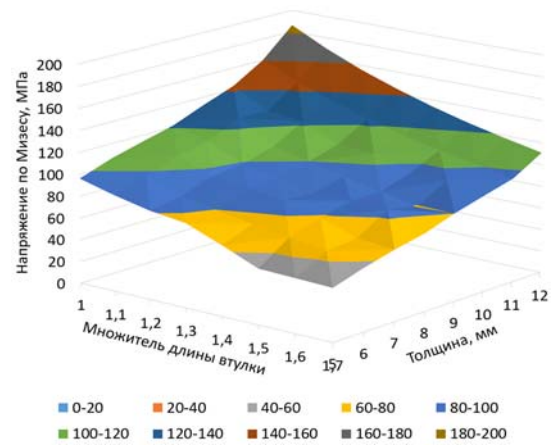
X13	Удлинение рабочей зоны валка, мм	$X13 = X3 * 0,25$	$X13 = X3 * 0,25$
X14	Толщина кассеты, мм	$X14 = X23 + (X23 * 0,8)$	$X14 = X23 + (X23 * 0,8)$
X20	Фаска площадки и подушек, мм	$X20 = X21/3$	$X20 = X21/3$
X21	Ширина плоского основания подушки с отверстиями для болтового крепления к кассете, мм	$X21 = E1$	$X21 = E1$
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	$X23 = \left(\frac{Dз.макс.+10}{2}\right) - \left(\frac{Dпр.мин.}{2}\right)$	$X23 = \left(\frac{Dз.макс.+10}{2}\right) - \left(\frac{Dпр.мин.}{2}\right)$
*пример выбранных значений параметров для типоразмера клетки 30-70			
Параметры для определения шеек валка, втулок, подушек и кассеты			
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 выбора подшипников скольжения в виде бронзовых втулок разработана процедура их параметрического прочностного расчёта (рисунок 5), выполняемого для множества комбинаций длины и толщины.

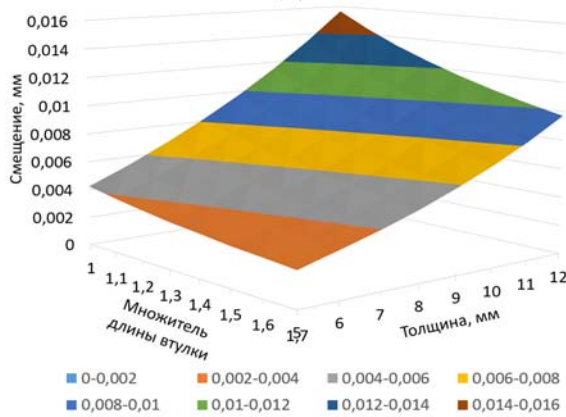
Установлено влияние геометрии втулки на напряжённое состояние: увеличение длины повышает запас прочности, а увеличение толщины при фиксированном наружном диаметре может его снижать (рисунок 5). Усилие прокатки определяется автоматически в ПРМ на основе методики поциклового расчета энергосиловых параметров процесса.



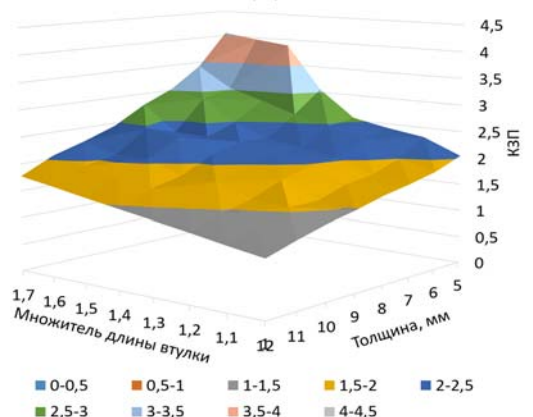
(а)



(б)



(в)

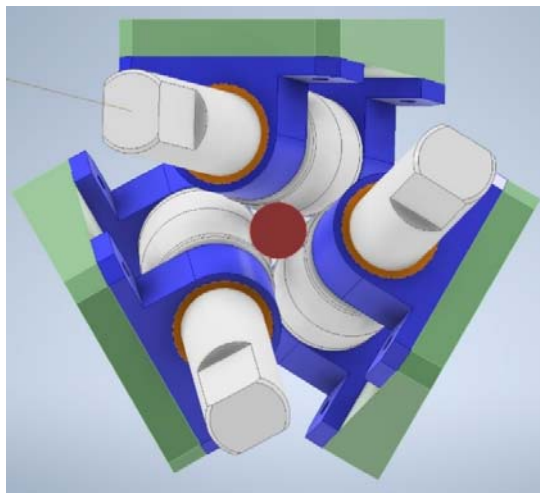


(г)

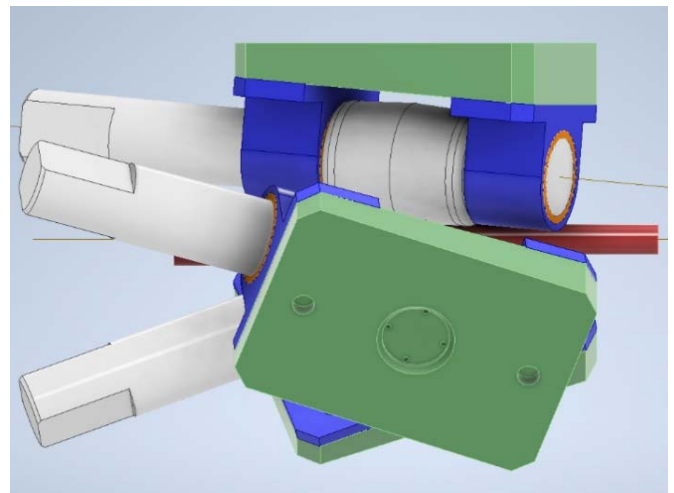
Рисунок 5 – (а) параметрический расчет геометрии втулок; (б) – напряжение по Мизесу, (в) – смещение, (г) – коэффициент запаса прочности (КЗП).

Далее спроектирована параметрическая модель кассеты вала. Толщина кассеты определяется ходом валков, который рассчитывается по максимальному диаметру заготовки и минимальному диаметру прутка. Определены зависимости для фасок, технологических зазоров, обеспечивающие технологичность сборки. Валковое соединение (рисунок 6 а-в) формируется круговым массивом из трёх узлов с шагом 120° , что обеспечивает автоматическую синхронную перестройку системы.

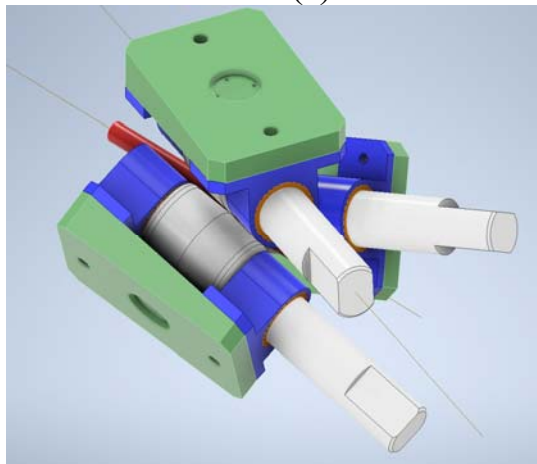
Для разработанного нажимного устройства механического типа (винт-гайка) в ПРМ реализован автоматизированный выбор диаметра винта и гайки по коэффициентам запаса прочности согласно ГОСТ 10177-82 (рисунок 7).



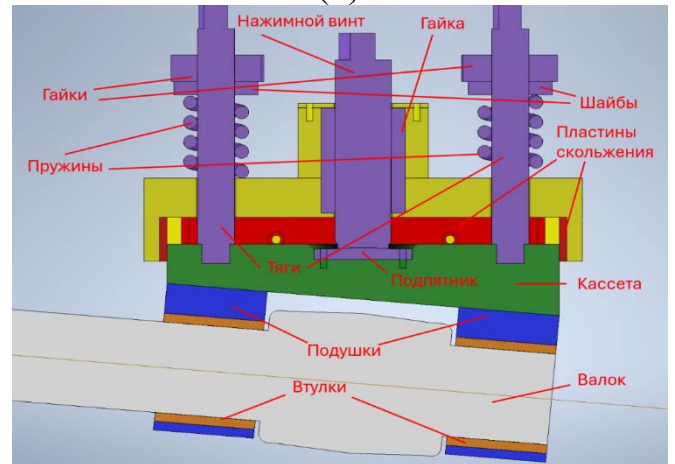
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 6 – Вид полученного валкового соединения: (а) вид спереди; (б) вид сбоку; (в) изометрический вид; (г) продольное сечение валкового соединения с нажимным устройством

Диаметр мм	D гайки мм	Шаг мм	d1 мм	d2 мм	dcp мм	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	56,13	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 7 – Расчетные таблицы для выбора диаметра винта и гайки по достаточному коэффициенту запаса прочности.

Геометрия валкового узла и нажимного устройства связаны параметрическими зависимостями, обеспечивающими адаптивное изменение

габаритов. Для уравнивания валков выбрано пружинное устройство как наиболее компактное и простое для министанов (рисунок 6 г). Определены зависимости для диаметров тяг, пружин и монтажных зазоров.

На завершающем этапе сформирована параметрическая модель станины коробчатого закрытого типа с прямоугольным основанием, вертикальными стенками и поперечинами с окнами под кассеты (рисунок 8). Для повышения прочности предусмотрены рёбра прочности. Геометрия станины полностью ассоциирована с параметрами валкового соединения.

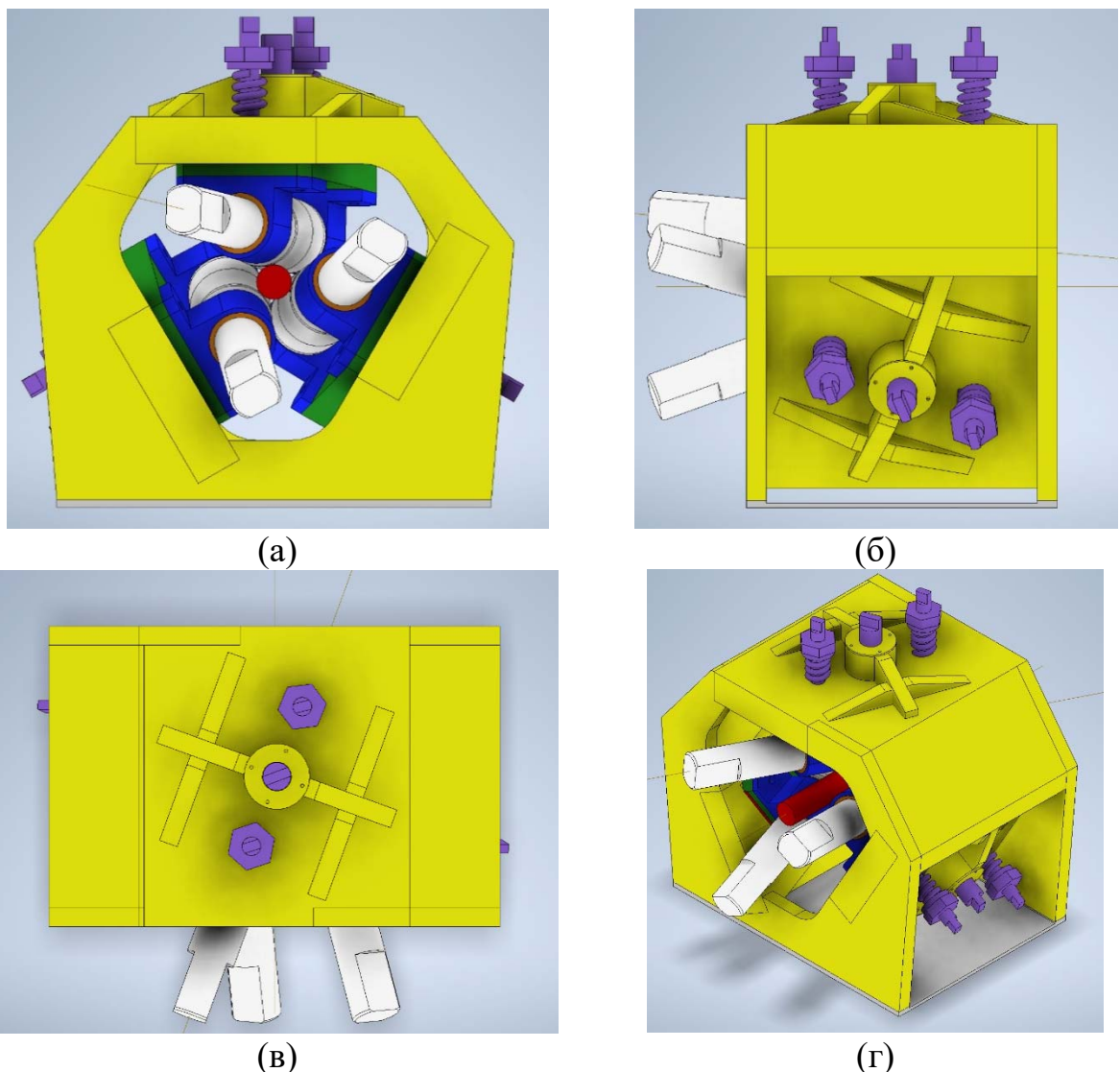


Рисунок 8 – Общий вид 3D модели рабочей клетки: (а) – вид спереди (входная сторона); (б) – вид сбоку; (в) – вид сверху; (г) – изометрия.

Основные массогабаритные и энергетические параметры спроектированных по разработанному алгоритму трёхвалковых клеток представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные массогабаритные и энергетические параметры спроектированных по разработанному алгоритму трёхвалковых клеток.

Типоразмер	Диаметр валка (D _в), мм	Масса валка (M _в), кг	Масса валковой группы (M _{в.г.}), кг	Масса клетки (M _к), кг	M _в /M _к	Ширина клетки (B), мм	Длина клетки (L), мм	Высота клетки (H), мм	Суммарная мощность прокатки (N), кВт
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

Разработанный алгоритм обеспечивает последовательное автоматизированное проектирование трёхвалковой клетки винтовой прокатки, начиная от технологических параметров процесса и заканчивая готовой трёхмерной моделью оборудования. Реализованный параметрический и модульный подход обеспечивает масштабируемость, устойчивость перестроений и снижение трудоёмкости конструкторских работ.

В четвертой главе выполнена валидация разработанных параметрических моделей трёхвалковой клетки винтовой прокатки путём проведения проверочных прочностных расчётов, анализа устойчивости модели и оценки работоспособности конструкций различных типоразмеров.

Основной задачей этапа являлась проверка работоспособности модели при наиболее тяжёлом режиме прокатки, соответствующем максимальному обжатию, наибольшему диаметру заготовки и материалу с высоким сопротивлением деформации. В случае неудовлетворительных результатов алгоритм предусматривает итерационный возврат на предыдущие стадии проектирования для корректировки параметров.

Для валидации предварительно определены нагрузки и граничные условия. Статический расчёт на прочность в среде Autodesk Inventor выполнен методом конечных элементов. В качестве внешних воздействий приняты радиальное

усилие на валок, прикладываемое к пятну контакта валка с прутком, и крутящий момент на валке. Расчет энергосиловых параметров реализован в общем ПРМ и передаются в САД-модель в качестве исходных данных. Площадь контакта аппроксимирована двумя полуэллипсами, параметры которых автоматически формируются в ПРМ на основе поциклового расчета ширины и длины контакта.

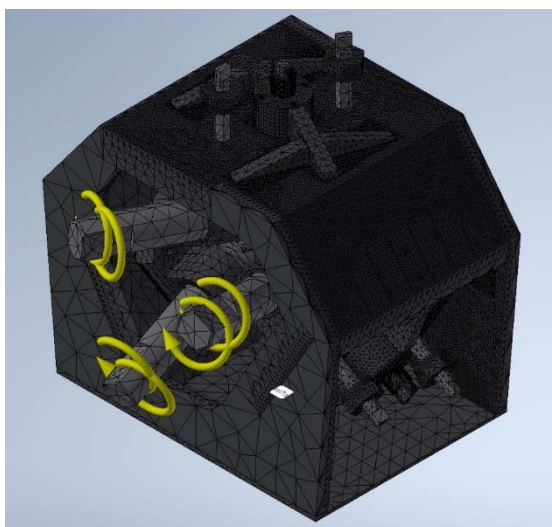
Для моделирования использованы свойства материалов, добавленных в базу данных ПРМ: сталь 09Г2С (станина и кассета), сталь 40Х (валок, винт, тяги) и бронза БрАЖ9-4 (втулки и пластины скольжения). Для повышения точности в наиболее нагруженных узлах применена локально сгущённая конечно-элементная сетка размером 0,5–10 мм.

Оценка прочности выполнена по эквивалентным напряжениям Мизеса (5):

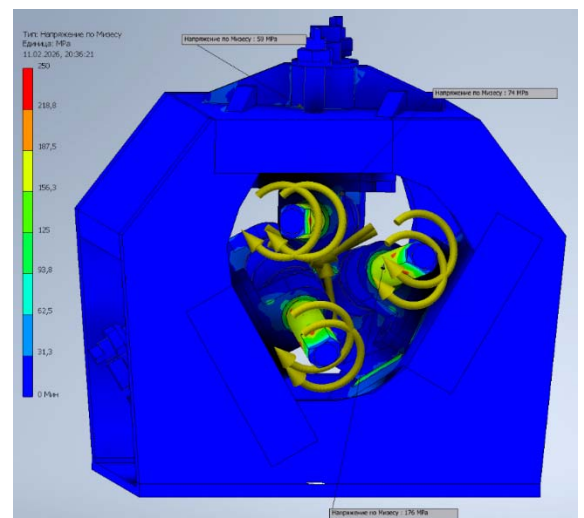
$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (5)$$

Коэффициент запаса прочности (КЗП) определялся по отношению максимального σ_{vm} к σ_T (или σ_B). Коэффициент жёсткости клетки вычислялся по отношению максимального усилия прокатки к суммарному упругому смещению, полученному в МКЭ-расчёте (6):

$$C = P_{max}/f_{МКЭ}. \quad (6)$$



(a)



(б)

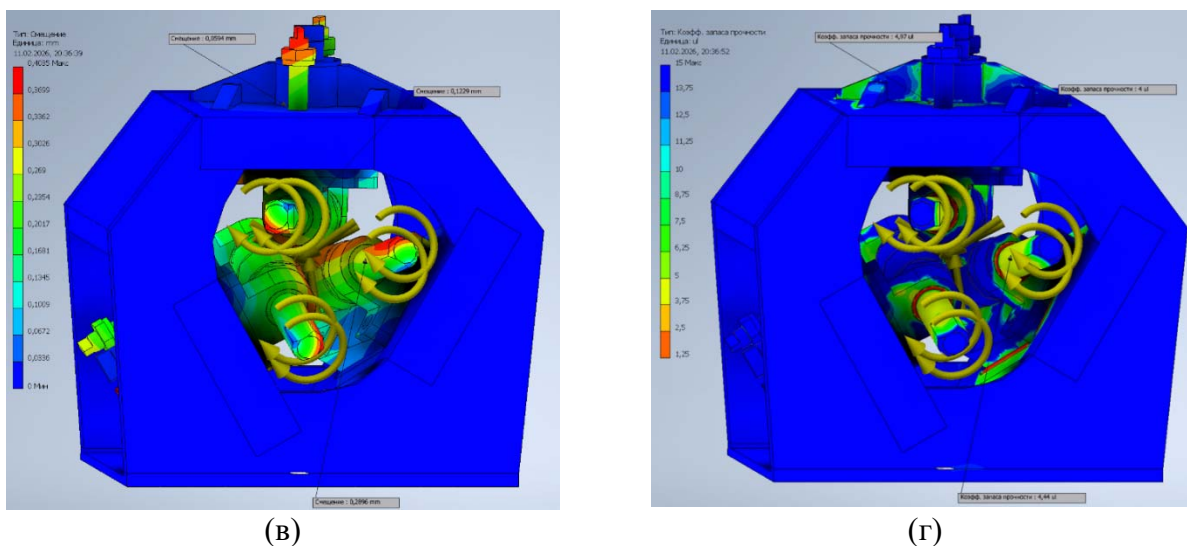


Рисунок 9 – Расчёт модели типоразмера 10–30 эпоры: (а) сетка КЭ и приложение нагрузок; (б) эпора распределения напряжений по Мизесу; (в) эпора распределения смещений; (г) эпора распределения КЗП

Проведена проверка параметрической модели на устойчивость. Под устойчивостью понимается способность модели корректно перестраиваться при варьировании исходных параметров без дополнительных уточнений. Модель надёжно функционирует в рекомендуемых диапазонах углов подачи ($10\text{--}25^\circ$) и раскатки ($5\text{--}15^\circ$) для всех исследованных типоразмеров (от 10–30 до 60–160). При выходе параметров за рациональные пределы фиксируются ошибки построения и интерференции, что подтверждает корректность заложенных геометрических ограничений.

Выполнены прочностные расчёты для клеток типоразмеров 10–30 (рисунок 9 б-г), 30–70 и 60–160. Получены поля напряжений, смещений и КЗП для всех основных узлов. Максимальные напряжения локализуются для валка в зоне очага деформации; в подушках — в контакте со втулками; для станины в верхней поперечине и зоне контакта пластин скольжения с кассетой. Величина напряжений не превышают предел текучести применённых материалов. Минимальные КЗП для станины соответствуют традиционно рекомендуемым значениям (более 10 по критерию σ_B).

Максимальные смещения для вала составили до 1,07 мм. Полученные значения не превышают допустимых отклонений по диаметру проката согласно требованиям ГОСТ 22411–77 и ГОСТ 26492–85 для групп повышенной точности (таблица 4).

Разработанная параметрическая модель трёхвалковой клетки винтовой прокатки обладает достаточной прочностью, жёсткостью и устойчивостью к адаптивным перестроениям. Модель корректно перестраивается для типоразмеров 10–30, 30–70 и 60–160 и обеспечивает соответствие эксплуатационным требованиям при максимальных расчётных нагрузках.

Таблица 4 – Сравнительные результаты проверочных расчётов моделей типоразмеров 10–30, 30–70 и 60–160.

Узел/ Деталь	Напряжение по Мизесу, МПа	σ_t / σ_b материала, МПа	Мин. КЗП (по σ_t / σ_b)	Смещение, мм	Предельные отклонения* по диаметру прутка, мм (ГОСТ 22411– 77)	Предельные отклонения* по диаметру прутка, мм (ГОСТ 26492–85)	Коэффициент жёсткости С, МН/мм
Типоразмер 10-30							
Валок	176	780 / 980	6,7 / 8,4	0,29	+1,0 -0,5	+0,4 -0,6	0,206
Подушка	74	295 / 630	4,7 / 10,1	0,12			
Станина	59	295 / 630	5,2 / 11,1	0,06			
Типоразмер 30-70							
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			
Типоразмер 60-160							
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

В пятой главе выполнена оценка эффективности разработанных конструктивных решений, проведено сравнение параметрических моделей трёхвалковых клеток с существующими аналогами, разработана технология перевалки валков и реализован механизм автоматической генерации конструкторской документации на основе преднастроенных шаблонов.

Сравнительный анализ с другими конструкциями (таблица 5) показал, что полученные по алгоритму модели при сопоставимых диапазонах прокатки обеспечивают существенное снижение массы и габаритов. В зависимости от

типоразмера уменьшение массы составляет порядка 15–65 %, а условный объём рабочей клетки сокращается в среднем в 1,3–3,0 раза. Достигнутый эффект обусловлен оптимизацией компоновки, рационализацией формы и толщин деталей, а также исключением избыточных конструктивных элементов. Снижение массы и объёма (рисунок 10а) способствует уменьшению капитальных затрат, упрощению транспортировки, монтажа и интеграции клетки в прокатную линию.

Показатель относительной металлоёмкости (отношение массы валка к массе клетки) для новых конструкций увеличивается с 0,9–2,6 % до 2,5–4,6 %, (рисунок 10 в), что объясняется снижением общей массы клетки при сохранении требуемых параметров валкового узла. Рост данного показателя свидетельствует о более рациональном распределении металла и подтверждает обеспечение необходимой жёсткости и прочности при компактных габаритах.

Таблица 5 – Сравнение 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	30-60	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	440х420х5 10	765х630х8 80	1200х1500 х800	1200х1500 х900	1800х1800 х1260	2870х3880 х1060	510х500х3 10	950х960 х640	1350х147 0х880
3	Условный объём, м ³	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 металлоёмкости (Мв/Мкл)	$5,6 / 215 =$ 0,0260 ~ 2,60 %	$7,85 /$ 625,2 = 0,0126 ~ 1,26 %	$34,9 / 3880$ = 0,0090 ~ 0,89 %	$49 / 3800$ = 0,0129 ~ 1,29 %	$110 / 6682$ = 0,0165 ~ 1,65 %	$293,2 /$ 14782,68 = 0,0198 ~ 1,98 %	$4,49 / 183$ = 0,0245 ~ 2,45%	$63,73 /$ 1374 = 0,0464 ~ 4,64%	$171,83 /$ 4703 = 0,0370 ~ 3,70 %
7	Перевалка - Оснащение	Вручную	Вручную	Кран- балка	Кран- балка	Кран- балка	Кран- балка	Вручную	Кран- балка	Кран- балка
	- Ориентировочное время, ч	0,5-1	1-2	3	3	3	5	0,5-1	2	2

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

Применение разработанного алгоритма и параметрической модели существенно сокращает трудоёмкость проектирования. Если при традиционном подходе суммарная продолжительность разработки клетки составляет 9–12

месяцев, то при использовании предложенной методики срок может быть сокращён до 1 месяца при работе одного инженера-конструктора. Основные трудозатраты при этом приходятся на проверочные расчёты, контроль корректности модели и внесение корректирующих действий при необходимости.

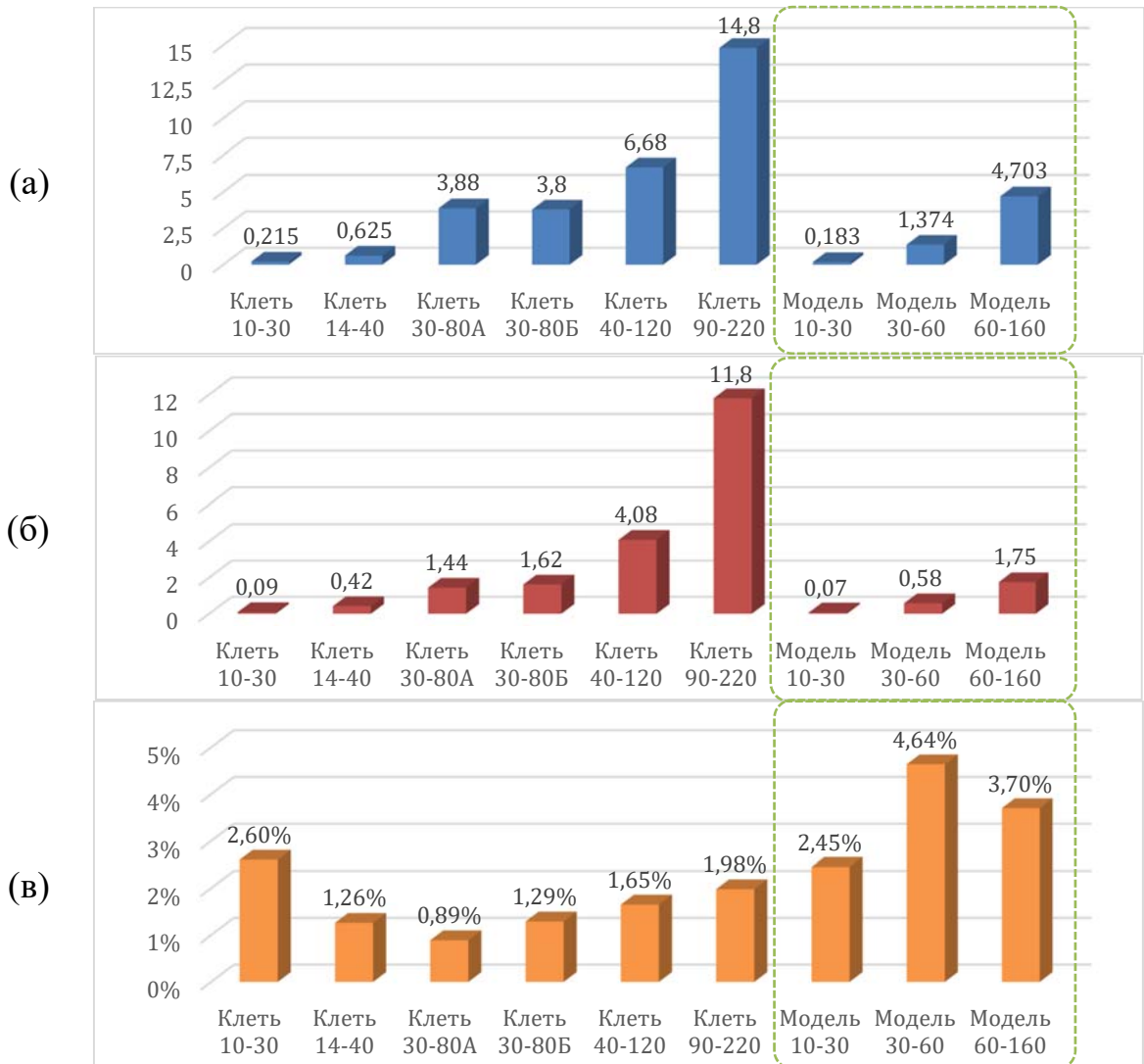


Рисунок 10 – Диаграммы сравнения существующих клеток и полученных моделей по:
(а) массе; (б) условному объёму; (в) металлоёмкости

Также в главе разработана и описана технологическая схема перевалки рабочих валков. Предложенное конструктивное решение обеспечивает замену валков без разборки станины и без смены кассет. Процесс организован для поэтапной последовательности операций, включающей отключение привода, отсоединение коммуникаций, демонтаж одной подушки (входной) и

конструкторской документации, что подтверждает техническую и экономическую целесообразность предложенных решений.

Заключение и основные выводы

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 σ_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 вала, 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 опубликованных работ

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.