

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**Пилипенко Виктор Владиславович**

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ КОЛЕЦ  
С НАРУЖНЫМ ГРЕБНЕМ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк – 2020

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент  
**СНИТКО** Сергей Александрович

**Официальные оппоненты:**

**Ведущая организация:**

Защита состоится «    »    2021 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 01.019.03 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, 1.203.

Тел. факс: +380 (62) 304-30-55, эл. почта: [uchensovet@donntu.org](mailto:uchensovet@donntu.org).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке организации ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, интернет <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «    »

2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 01.019.03



А.В. Яковченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Специализированные предприятия, как в России, так и за рубежом оснащены заготовочными прессами и кольцепрокатными станами, имеющими компьютерное управление. На станах можно прокатывать, как прямоугольные, так и фасонные в сечении кольца диаметром до 10 м и высотой до 5 м.

Актуальное значение имеют исследования, направленные на создание новых экономических профилей колец с наружным гребнем, разработку усовершенствованных математических моделей процессов их прокатки, методов расчета энергосиловых параметров и специализированной компьютерной программы расчета рациональных режимов деформации металла, автоматизированное проектирование чистовых и черновых фланцев, а также калибровок для штамповки кольцевых заготовок с наружным гребнем и прокатки на кольцепрокатном стане фланцев с наружным гребнем для изготовления из них путем механической обработки главных валков колесо-прокатного стана.

**Степень разработанности темы.** Использование известных, но не специализированных для условий кольцепрокатного производства систем компьютерного проектирования, например, таких как Autocad, требует значительных затрат времени. Указанный комплекс не имеет специализированных для рассматриваемого класса задач программных средств. Вместе с тем, вопросам автоматизированного проектирования контуров сечений железнодорожных колёс, а на этой основе и калибровок, посвящены работы, выполненные под научным руководством д-ра техн. наук Яковченко А.В. и д-ра техн. наук Снитко С.А. В их основе лежит использование библиотек составных элементов профилей, которые программа в автоматическом режиме объединяет в единый контур, выполняет все расчеты и проектирует профиль колеса. Они стали базой для работ по автоматизированному проектированию профилей колец с наружным гребнем, и на этой основе – калибровок.

Созданные ранее аналитические модели процессов прокатки колец не учитывали уширение металла в радиальном и осевом очагах деформации и другие факторы, что требует их совершенствования.

Конечно-элементное моделирование процессов прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане может быть реализовано в программной среде DEFORM 3D. Вместе с тем для обеспечения качественного и количественного соответствия зависимостей, полученных на базе расчетных и экспериментальных данных, метод моделирования требует совершенствования.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является: развитие теории процесса прокатки колец; автоматизированное проектирование нового экономичного профиля фланца с наружным гребнем, необходимого для изготовления путем его механической обработки главного валка колесо-прокатного стана; разработка усовершенствованной технологии прокатки фланца на радиально-осевом кольцепрокатном стане.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие основные задачи.

1. Выполнить развитие теории процесса прокатки колец:

- разработать усовершенствованную математическую модель процесса прокатки прямоугольных в сечении колец с учетом уширения металла в радиальном и осевом очагах деформации;
- разработать усовершенствованный метод расчета силы в радиальном очаге деформации при прокатке прямоугольных в сечении колец;
- установить механизм процесса прокатки колец с наружным гребнем, в случае их малой раскатки, определяющий выкатку наружной поверхности фланца на основном этапе прокатки.

2. Усовершенствовать метод конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане.

3. Выполнить автоматизированное проектирование профиля фланца с наружным гребнем, необходимого для получения путем его механической обработки главного валка колесопрокатного стана, калибровок для штамповки и прокатки, а также расчет режимов деформации металла.

**Объект исследования.** Технологические процессы штамповки и прокатки колец.

**Предмет исследования.** Закономерности формоизменения металла в процессах прокатки колец, методы расчета энергосиловых параметров, автоматизированное проектирование профилей колец с наружным гребнем, а также калибровок и режимов деформации металла для их штамповки на заготовочных прессах и прокатки на радиально-осевых кольцепрокатных станах.

**Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые установлена аналитическая зависимость

$$\frac{\sqrt{R_n^2 - \left( \frac{R_n^2 - R_1^2 + b^2}{2b} \right)^2}}{\sqrt{R_v^2 - \left( \frac{R_v^2 - R_2^2 + a^2}{2a} \right)^2}} = \frac{p_2}{p_1} \quad (a = R_v - R_2 + s_2, \quad b = R_n + R_1 - s_1),$$

которая раскрывает механизм процесса прокатки прямоугольных в сечении колец в части взаимного влияния геометрических параметров радиального очага деформации ( $s_1, s_2, L_1, L_2, R_1, R_2, R_n, R_v$ ) и средних контактных давлений ( $p_1, p_2$ ), используемая в процессе разработки технологии прокатки кольца при определении его текущих обжатий по толщине ( $s_1, s_2$ ) и текущих длин очагов деформации ( $L_1, L_2$ ) в зоне контакта металла с каждым из валков, где  $s_1, s_2$  – текущие обжатия кольца по толщине главным приводным валком и валком-оправкой, соответственно;  $L_1, L_2$  – текущие длины очагов деформации в зоне контакта металла с главным приводным валком и валком-оправкой, соответственно;  $R_1, R_2$  – радиусы главного приводного валка и валка-оправки соответственно;  $R_n, R_v$  – текущие наружный и внутренний радиусы кольца, соответственно.

2. На базе экспериментальной информации и результатов конечно-элементного моделирования процесса прокатки прямоугольных в сечении колец для колец типа «втулка» получили дальнейшее развитие представления о зависимостях: коэффициентов напряженного состояния металла в зоне его контакта с главным валком ( $n_1$ ) и валком-оправкой ( $n_2$ ) и коэффициента плеча силы прокатки  $K_g$  в радиальном очаге деформации, а также показателей уширения металла в радиальном  $K_r$  и осевом  $K_o$  очагах деформации от степени логарифмической деформации, фактора формы очага деформации, фактора формы сечения кольца.

3. Впервые на базе результатов конечно-элементного моделирования установлен максимально допустимый диапазон изменения отношения средних контактных давлений  $p_2/p_1 \leq (0,25-0,5)$  в радиальном очаге деформации на каждом из оборотов кольца, соответственно, с валком-оправкой и главным валком, в случае его малой раскатки ( $D_0 \geq 0,65D_{som}$ ), при котором обеспечивается выкатка наружной поверхности фланца, включая его гребень, на основном этапе прокатки ( $D_m \leq 0,8D_{som}$ ) без превышения допустимого значения его внутреннего диаметра ( $D_0, D_m, D_{som}$  – соответственно, начальный, текущий и конечный внутренние диаметры кольца при прокатке).

#### **Теоретическая значимость работы.**

1. Разработана усовершенствованная математическая модель процесса прокатки прямоугольных в сечении колец, учитывающая уширение металла в радиальном и осевом очагах деформации, а также взаимное влияние геометрических параметров радиального очага деформации и средних контактных давлений.

2. Установлена аналитическая зависимость, раскрывающая механизм процесса прокатки прямоугольных в сечении колец в части взаимного влияния геометрических параметров радиального очага деформации и средних контактных давлений, которая используется в методах определения текущих обжатий кольца по толщине и текущих длин очагов деформации в зонах контакта металла с главным валком и валком-оправкой.

3. Разработан усовершенствованный метод расчета энергосиловых параметров в радиальном очаге деформации при прокатке прямоугольных в сечении колец.

4. Установлен максимально допустимый диапазон изменения отношения средних контактных давлений металла  $p_2/p_1 \leq (0,25-0,5)$ , соответственно, с валком-оправкой и главным валком на каждом из оборотов кольца, в случае его малой раскатки, при котором обеспечивается выкатка наружной поверхности фланца, включая его гребень, на основном этапе прокатки без превышения допустимого значения его внутреннего диаметра.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработаны метод и компьютерная программа проверки адекватности зависимости расчета напряжения течения металла, учитывающей процессы динамического преобразования структуры при горячей прокатке, на основе компьютерной базы цифровой информации об экспериментальных кривых течения стали и её сплайн-интерполяции при экстраполяции напряжения течения металла в зависимости от степени логарифмической деформации.

2. Усовершенствован метод конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане.

3. Получены экспериментальные данные силовых и геометрических параметров процесса прокатки фланца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане. Выполнен анализ механизмов влияния сил прокатки и, соответственно, скорости роста диаметра кольца на процессы формоизменения металла на различных этапах его прокатки.

4. Созданы метод и компьютерная программа разработки эмпирических уравнений для расчета коэффициентов напряженного состояния металла в зоне его контакта с главным валком и валком-оправкой и коэффициента плеча силы прокатки.

5. На основе созданной математической модели процесса прокатки колец разработана специализированная компьютерная программа расчета рациональных режимов деформации металла.

6. Выполнено автоматизированное проектирование нового экономичного профиля фланца с наружным гребнем, необходимого для изготовления путем его механической обработки главного валка колесопрокатного стана, а также калибровок и режимов деформации металла для штамповки и прокатки кольцевых заготовок с наружным гребнем на кольцепрокатном стане. Показано, что имеет место выполнение всех элементов профиля, обеспечена минимизация разнотолщинности и овальности кольца на завершающей стадии прокатки, сила и мощность прокатки не превышают допустимые значения.

**Методология и методы исследования.** При проведении теоретических исследований использованы основные положения теории обработки металлов давлением и теории пластичности. Экспериментальные исследования выполнены на промышленном радиально-осевом кольцепрокатном стане.

Расчет констант эмпирических формул выполнен на базе метода наименьших квадратов с использованием программ компьютерной обработки цифровой информации. Для проверки адекватности разработанных эмпирических формул использованы методы математической статистики.

Конечно-элементное моделирование процесса прокатки колец на кольцепрокатном стане реализовано в программной среде DEFORM 3D. Построение модели осуществляли в специализированном шаблоне Ring Rolling. Проверка адекватности используемой конечно-элементной модели выполнена путем сравнения расчетной информации с экспериментальными данными, полученными в условиях промышленного производства колец.

Компьютерная реализация разработанных математических моделей и методов выполнена в среде Delphi, проектирование профилей фланцев и калибровок выполнено с использованием имевшихся графических пакетов программ, совместимых с Autocad.

**Положения, выносимые на защиту.** Следующие основные научные разработки и положения выносятся на защиту.

1. Математическая модель процесса прокатки прямоугольных в сечении колец, учитывающая уширение металла в радиальном и осевом очагах деформации, а также взаимное влияние геометрических параметров радиального очага деформации и средних контактных давлений.

2. Метод разработки эмпирических уравнений для расчета коэффициентов напряженного состояния металла в зоне его контакта с главным валком и валком-оправкой и коэффициента плеча силы прокатки.

3. Механизм процесса прокатки колец с наружным гребнем, определяющий выкатку наружной поверхности фланца, включая его гребень, на основном этапе прокатки без превышения допустимого значения его внутреннего диаметра.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и новизна научных и технических решений, обоснованность выводов и рекомендаций работы подтверждаются корректным использованием апробированных методов исследований и научных теорий, адекватностью используемых конечно-элементных моделей, результатами экспериментальных исследований, выполненных в промышленных условиях, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научном семинаре кафедры «Обработка металлов давлением» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (2020 г.) и 5-и конференциях: 5 Межд. науч.-практ. конф. «Инновационные перспективы Донбасса», Донецк, 21-23 мая 2019 г.; 6 Межд. науч.-практ. конф. «Инновационные перспективы Донбасса», Донецк, 26-28 мая 2020 г.; IX Межд. науч.-тех. конф. «Техника и технология машиностроения», Омск, 8-10 июня 2020 г.; XXVII Межд. науч.-тех. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь, 14-20 сентября 2020 г.; V Межд. науч.-тех. конф. «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства», Алчевск, 15 октября 2020 г.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первый раздел «Состояние научно-технической задачи автоматизированного проектирования профилей, калибровок и технологии штамповки и прокатки колец».**

Как показал анализ технической литературы актуальное значение имеют исследования, направленные на создание новых экономичных профилей колец, в том числе с наружным гребнем, разработку усовершенствованных математических моделей процессов прокатки (рисунок 1), методов расчета энергосиловых параметров и специализированной компьютерной программы расчета рациональных режимов деформации металла.

Важное значение имеет автоматизированное проектирование чистовых и черновых фланцев, а также калибровок и режимов деформации металла для штамповки кольцевых заготовок с наружным гребнем и прокатки фланцев на кольцепрокатном стане, необходимых для изготовления из них путем механической обработки главных валков колесопрокатного стана, которые являются ответственным инструментом деформации. Их прокатка на кольцепрокатном стане направлена на экономию металла, повышение эффективности производства и увеличение срока службы катаных валков взамен литых.

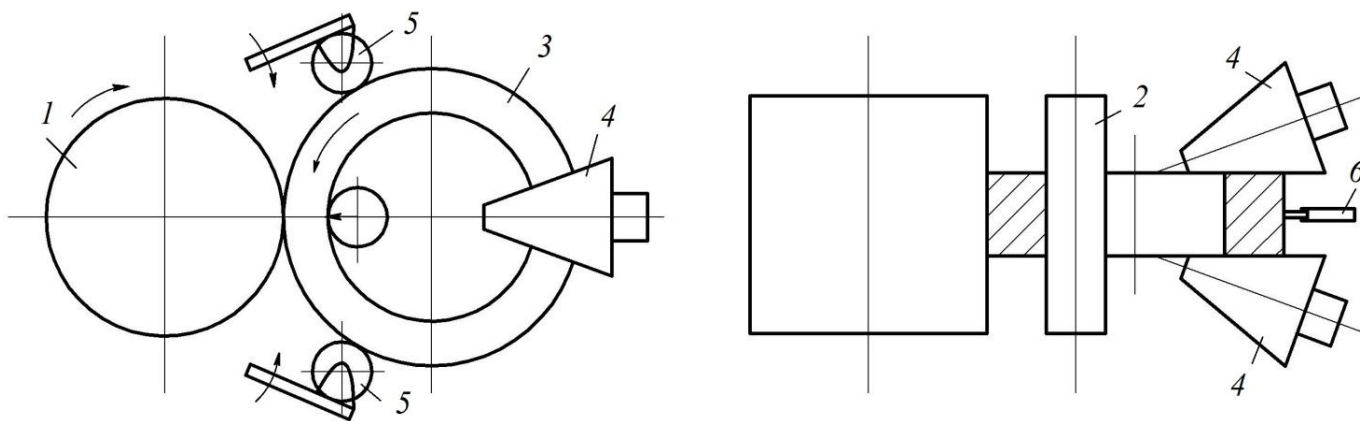


Рисунок 1. Схема прокатки кольца на радиально-осевом кольцепрокатном стане:

1 – главный приводной валок; 2 – валок-оправка; 3 – прокатываемое кольцо;  
4 – конические валки; 5 – центрирующие ролики; 6 – устройство для измерения диаметра кольца

### **Второй раздел «Методы и методики исследований».**

Выполнена адаптация метода конечно-элементного моделирования в системе DEFORM 3D процесса прокатки колец. Построение модели осуществляли в специализированном шаблоне Ring Rolling. При моделировании использовали концепцию напряжения течения, в соответствии с которой материал деформируется пластически, а сумма напряжений определяется в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения. Установлено, что зависимость для расчета напряжения течения металла, разработанная на базе теории, учитывающей накопленную деформацию в рассматриваемой точке очага, а также процессы динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации, адекватно описывает экспериментальные кривые течения для широкого диапазона изменения степени логарифмической деформации  $\bar{\varepsilon}$ , равном 0,03–1,65, и может использоваться для конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец.

Представлена методика проведения эксперимента, выполнена оценка точности измерения параметров процесса прокатки кольца. Значения толщины кольца и его внутреннего диаметра в процессе прокатки получили на базе показаний импульсных фотоэлектрических датчиков, установленных стационарно на кольцепрокатном стане. Значения сил прокатки в радиальном очаге деформации получили на базе показаний измерительных преобразователей давления в электрические сигналы, установленных стационарно на кольцепрокатном стане.

### **Третий раздел «Автоматизированное проектирование профилей колец с наружным гребнем и калибровок для их штамповки и прокатки»**

На базе специализированной компьютерной программы\* (рисунки 2, 3) выполнено автоматизированное проектирование контуров сечений чистовых механически обработанного и технологического фланцев, а также чернового фланца, который является новым разработанным профилем для изготовления из него путем механической обработки главного валка колесопрокатного стана.

\*Компьютерные программы разработаны Н.И. Ивлевой.

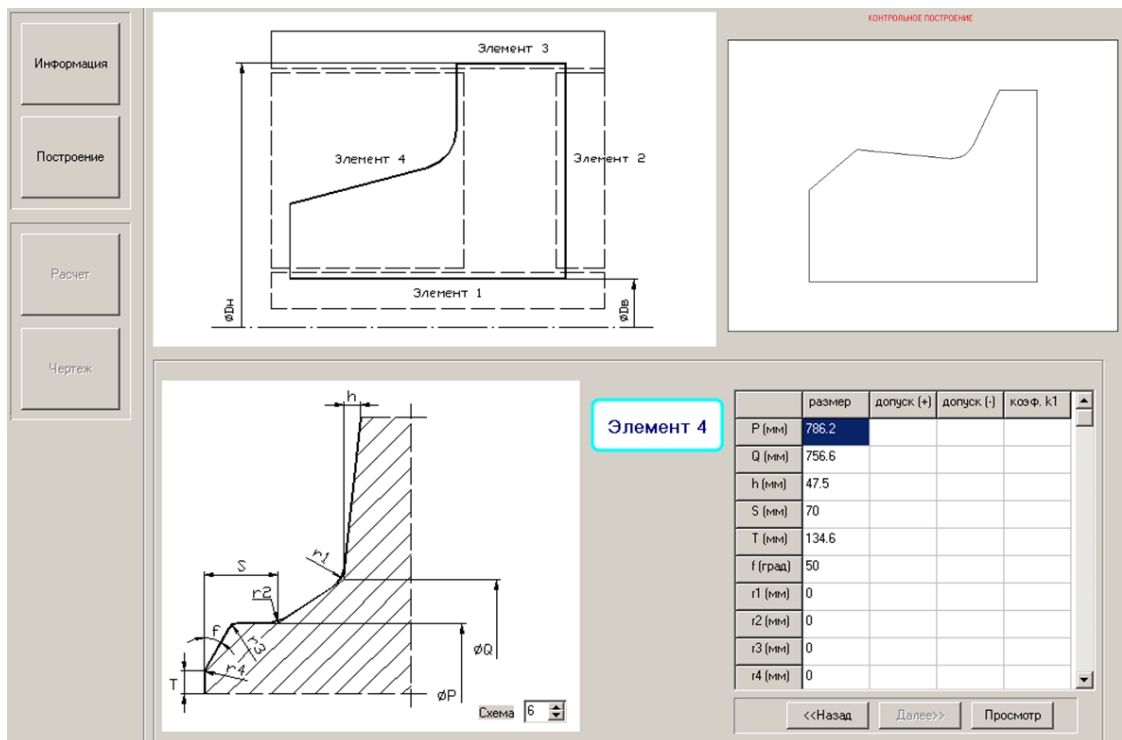


Рисунок 2. Задание исходной информации для проектирования чистового технологического фланца и его контрольное построение

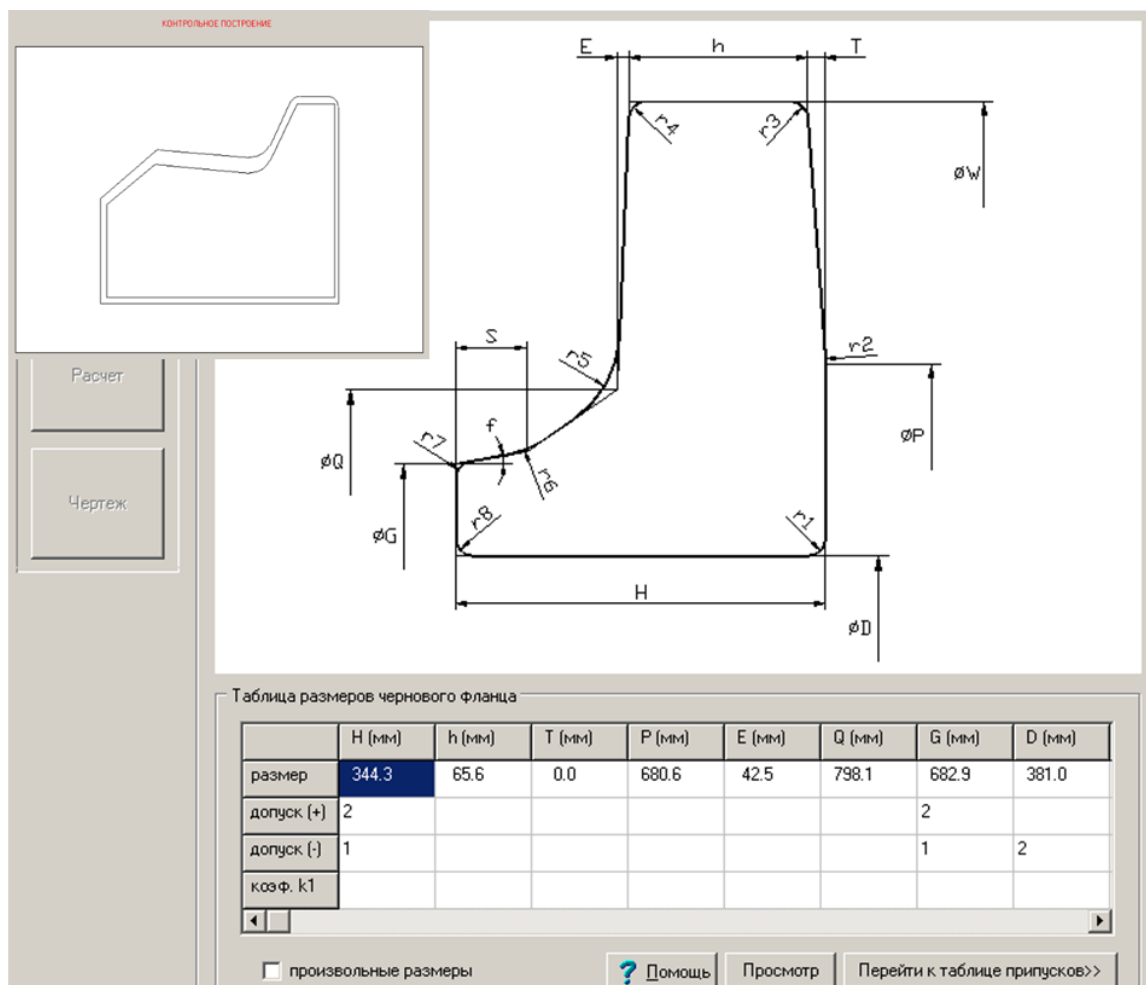


Рисунок 3. Окно задания полей допусков на прокатку черного фланца

Также выполнено автоматизированное проектирование калибровок (рисунки 4, 5).

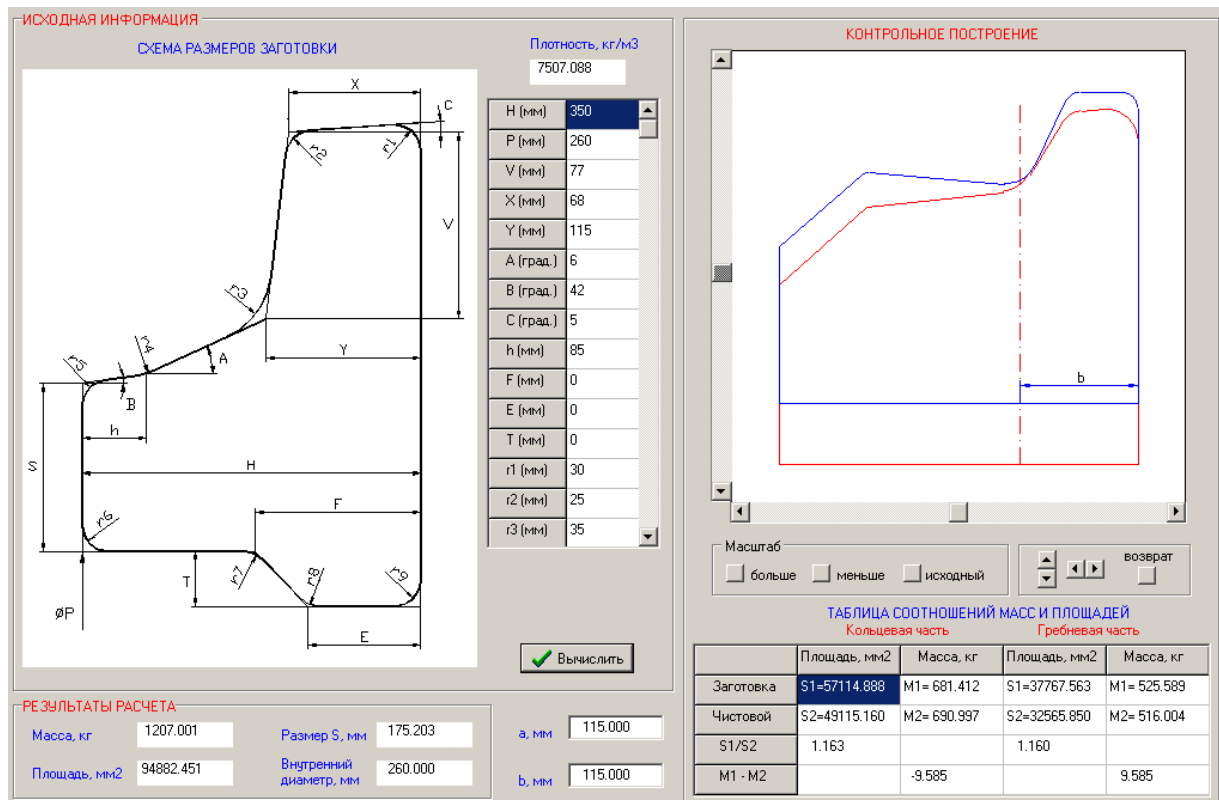


Рисунок 4. Окно программы проектирования калибровок

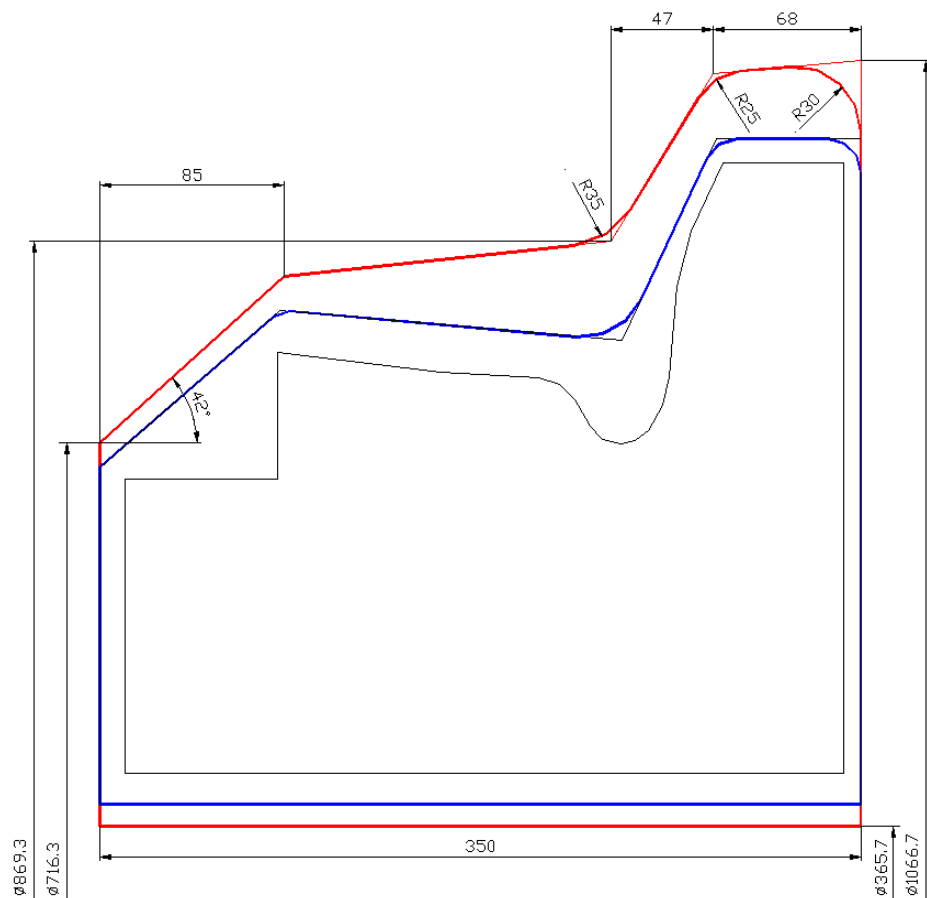


Рисунок 5. Совмещение контуров фланцев с наружным гребнем

В процессе автоматизированного проектирования калибровок (рисунки 4, 5) для штамповки заготовок с наружным гребнем и прокатки фланцев выполнено нормирование масс и вытяжек соответствующих частей штампованной заготовки и прокатанного фланца, захода гребневой части кольцевой заготовки в гребневую часть калибра, что обеспечивает выполнение условия выкатки гребня и исключает образование заката с его левой стороны.

На рисунке 5 представлено совмещение контуров: чистового механически обработанного главного вала колесопрокатного стана (черный контур); прокатанного на стане чернового фланца (калибровка по металлу для кольцепрокатного стана – синий контур); кольцевой заготовки с гребнем (калибровка по металлу для заготовочного пресса – красный контур).

Автоматизация процесса проектирования позволяет повысить производительность труда калибровщиков, а также улучшить качество чертежей и штампованно-катаных фланцев.

**Четвертый раздел «Совершенствование метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец, проверка адекватности результатов по отношению к экспериментальной информации».**

Совершенствование метода моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане заключается в следующем:

- определение напряжения течения металла при конечно-элементном моделировании процесса прокатки колец выполнено на базе зависимости, учитывающей накопленную деформацию и процессы динамического преобразования структуры при горячей прокатке (рисунок 6);

- предложен усовершенствованный метод выполнения расчетов параметров процесса прокатки колец и выхода на требуемую скорость роста диаметра кольца реализуемый в системе конечно-элементного моделирования, который аналогичен способу работы системы управления кольцепрокатным станом при решении этой же задачи (выхода на требуемую скорость роста диаметра кольца) при реализации соответствующей прокатки на практике.

На базе усовершенствованного метода выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки прямоугольного в сечении кольца типа «втулка». Качественный ход расчетных кривых (скорости роста наружного диаметра кольца (рисунок 7), наружного диаметра кольца, силы прокатки (рисунок 8) и температуры боковой поверхности кольца в зависимости от времени) соответствует экспериментальным кривым. Средние относительные отклонения расчетных значений от экспериментальных не превышают 12%.

Выполнены экспериментальные исследования силовых и геометрических параметров процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане. Точность измерений толщины кольца – 0,01%, внутреннего диаметра – 0,1%. Значения сил прокатки в радиальном очаге деформации получены на базе показаний измерительных преобразователей давления в электрические сигналы с погрешностью измерений  $\pm 0,1\%$ . Построенные графические зависимости скорости роста внутреннего диаметра кольца, толщины кольца (рисунок 10) и силы прокатки (рисунок 11) в зависимости от времени показали характер изменения параметров при нестационарном процессе прокатки.

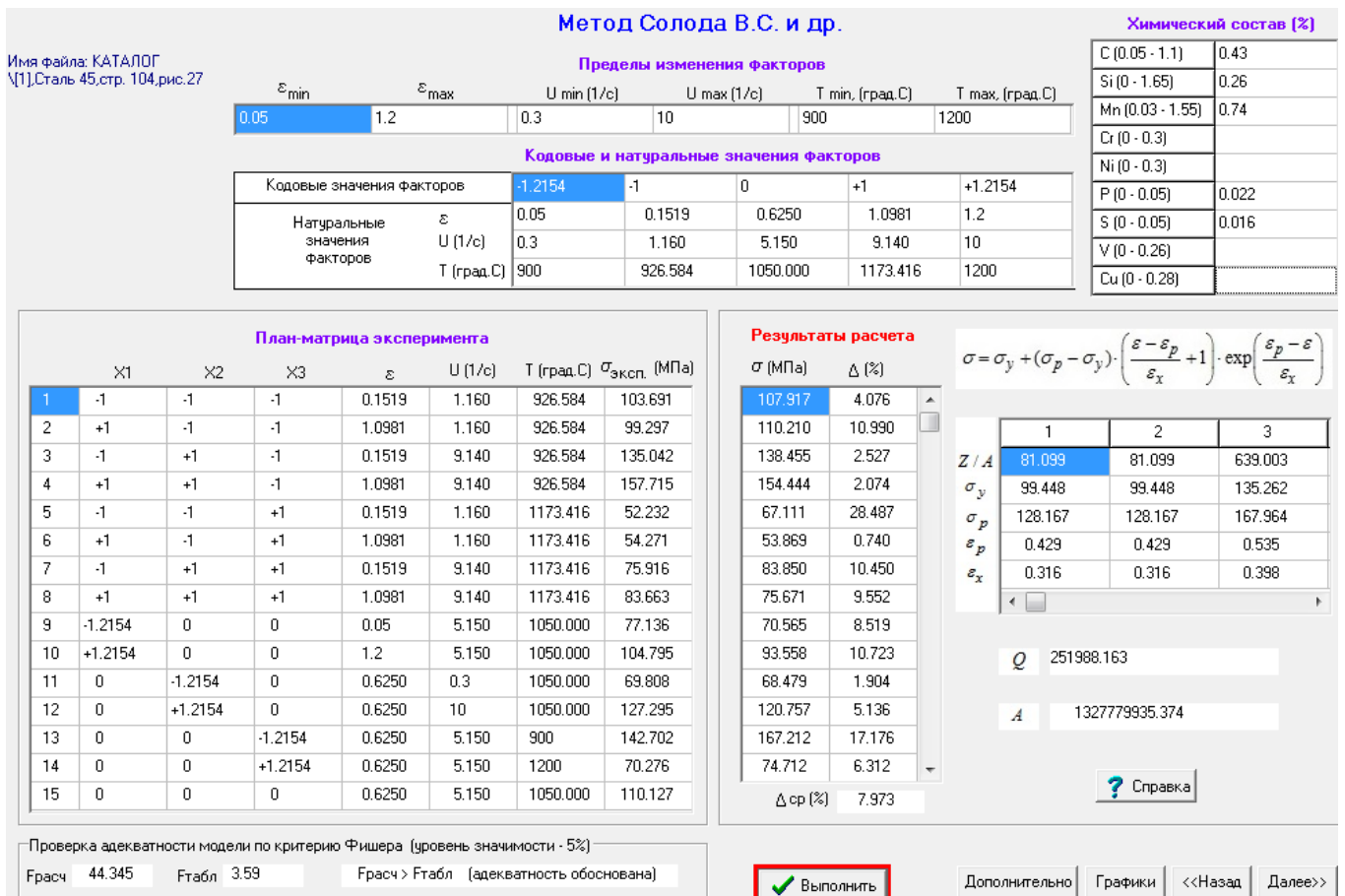


Рисунок 6. Окно программы определения термокинетических параметров зависимости Солода В.С. и др. для расчета напряжения течения  $\sigma$  стали 45

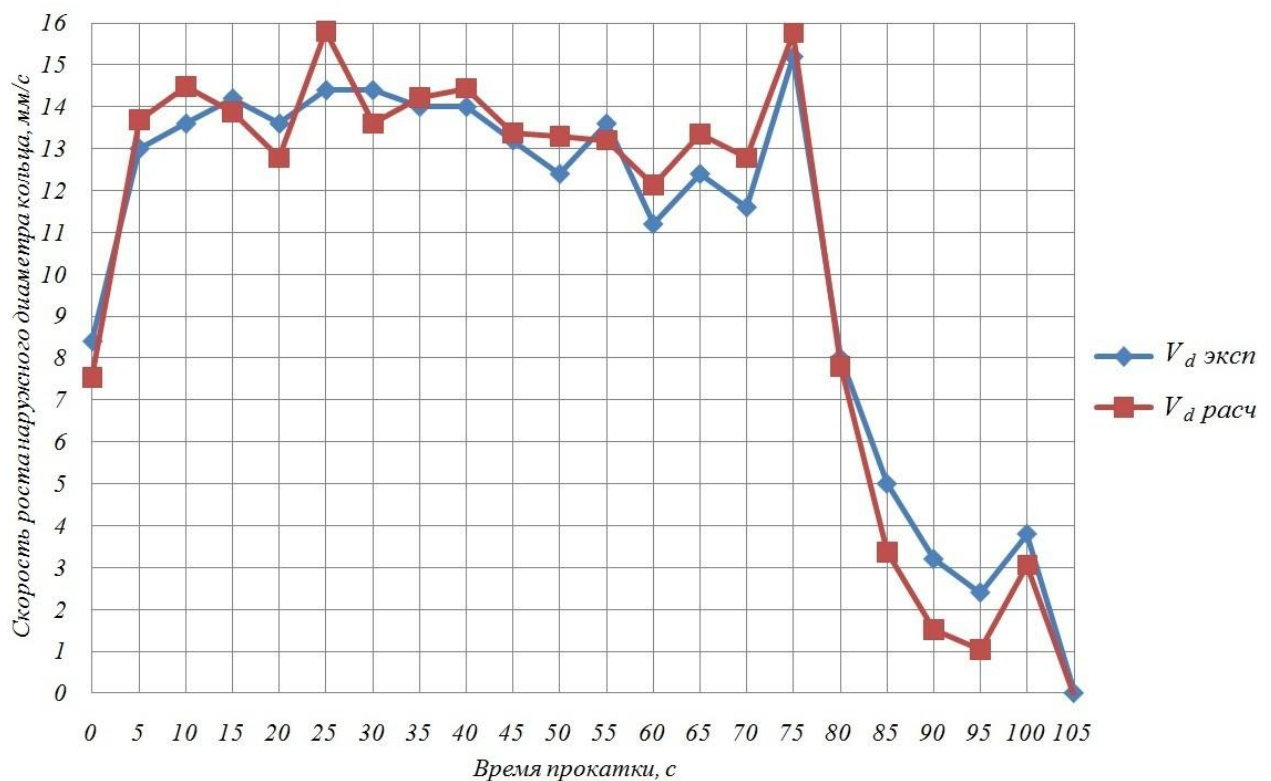


Рисунок 7. Зависимость скорости роста наружного диаметра прямоугольного в сечении кольца типа «втулка» от времени процесса прокатки

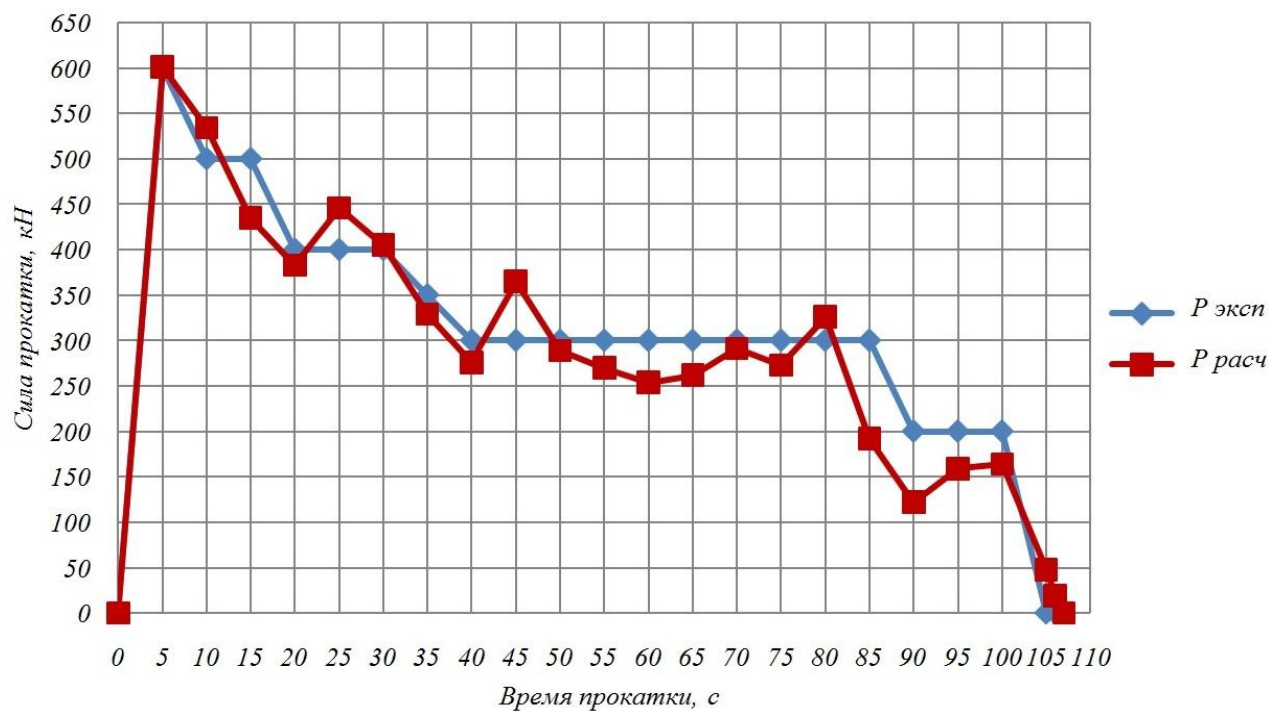


Рисунок 8. Зависимость силы прокатки прямоугольного в сечении кольца типа «втулка» от времени процесса прокатки

На базе усовершенствованного метода выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки кольца с наружным гребнем (фланца) на радиально-осевом кольцепрокатном стане (рисунок 9).

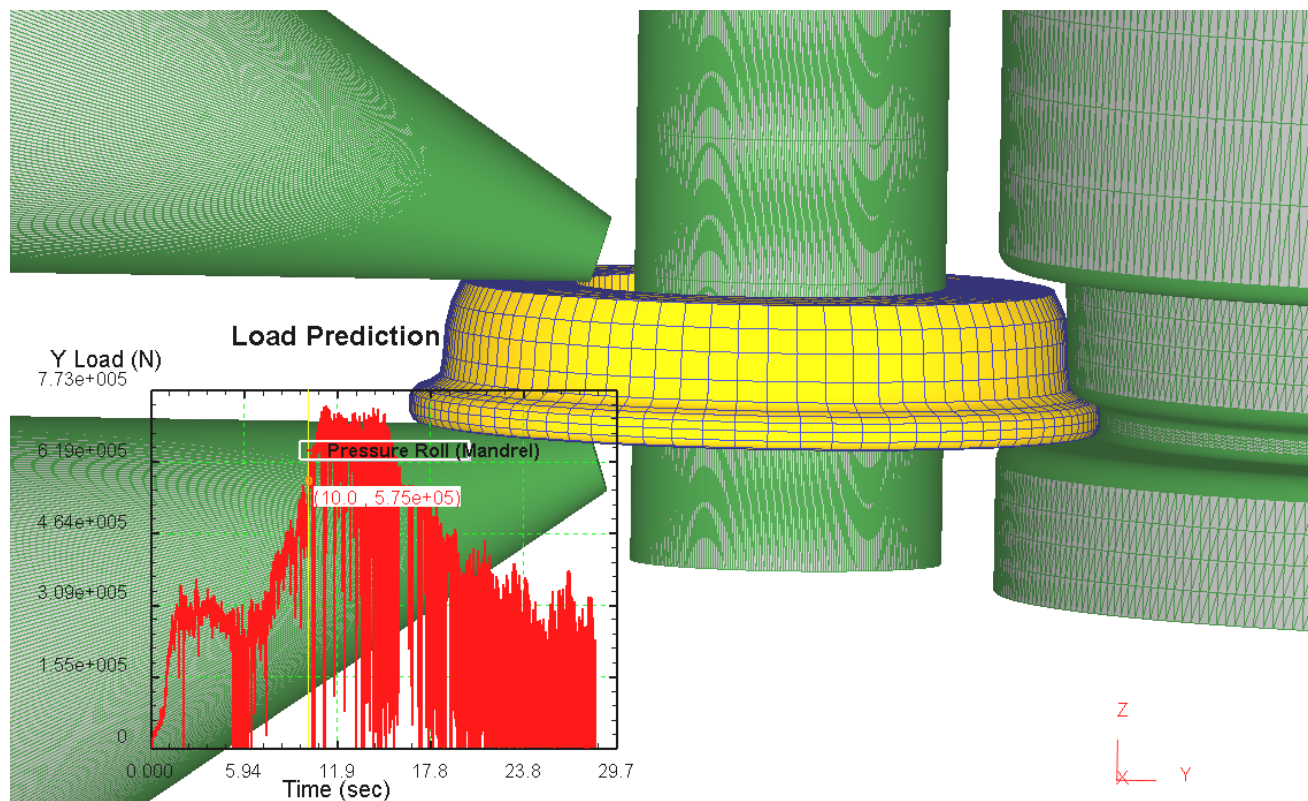


Рисунок 9. Визуализация конечно-элементного моделирования процесса прокатки фланца с наружным гребнем (распределение силы прокатки)

Полученные зависимости толщины кольца от времени адекватно описывают характер формоизменения металла, установленный экспериментальным путем (рисунок 10). Среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 1%. Характер изменения силы прокатки в радиальном очаге деформации в качественном отношении достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным (рисунок 11). Среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышают 15%.

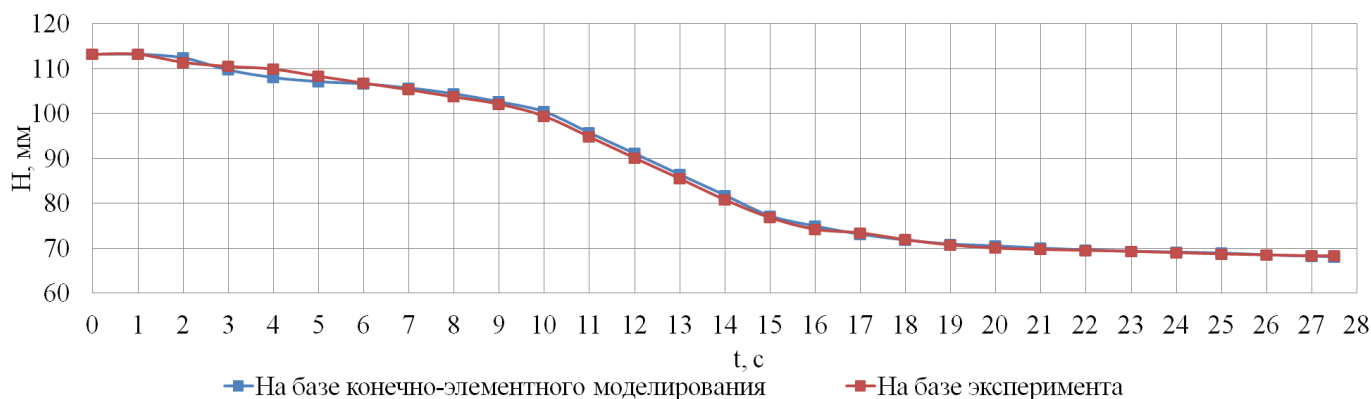


Рисунок 10. Зависимости толщины фланца от времени процесса прокатки

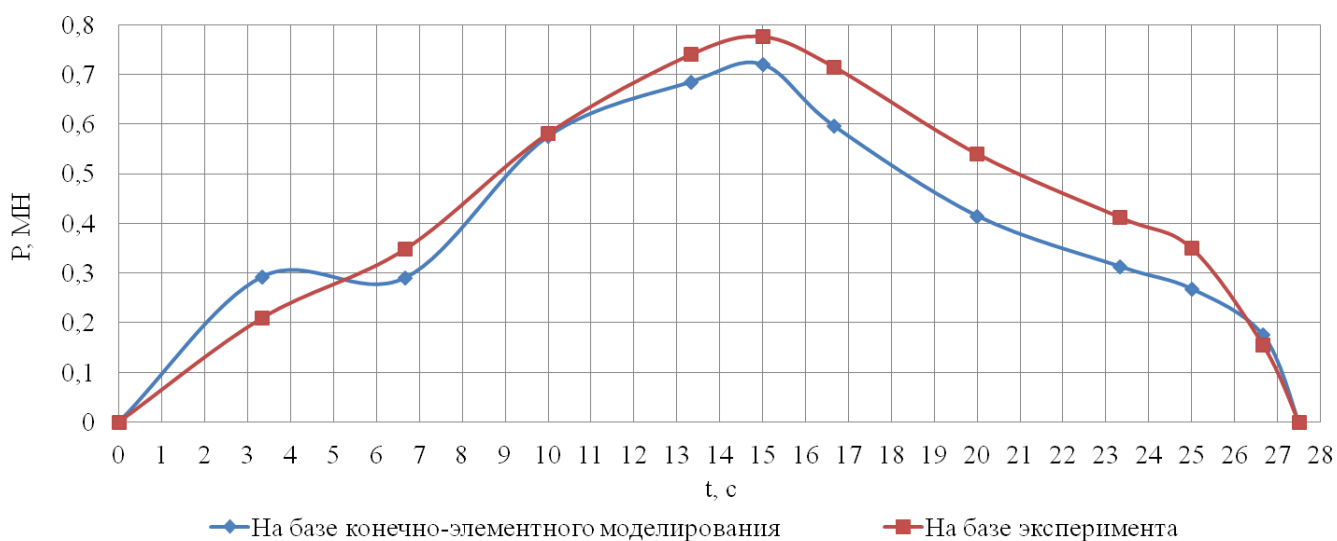


Рисунок 11. Зависимости силы прокатки фланца в радиальном очаге деформации от времени процесса прокатки

Установлено, что на завершающем этапе прокатки имеет место повторный рост разнотолщинности и овальности кольца, который связан с интенсивным снижением силы прокатки и, соответственно, с ростом неравномерности деформации металла. Отсутствие устойчивой тенденции к минимизации разнотолщинности и овальности кольца на завершающей стадии прокатки является недостатком. Его устранение (для получения разнотолщинности и овальности кольца на завершающей стадии менее 0,5–1,0 мм) обеспечивается менее интенсивным снижением силы прокатки и, соответственно, скорости роста диаметра кольца на завершающих этапах прокатки.

### Пятый раздел «Развитие теории процесса прокатки колец».

Разработана математическая модель процесса прокатки колец, которая учитывает уширение металла в радиальном и осевом очагах деформации, дает возможность на каждом обороте определить радиальное и осевое обжатия, текущие размеры (толщину, высоту, наружный и внутренний диаметры), скорость роста диаметра кольца, скорость движения валка-оправки, а также время оборота кольца, общее время прокатки и количество оборотов.

Для радиального очага деформации (рисунок 12) решена задача распределения суммарного обжатия металла вертикальными валками на обжатие ( $s_1$ ), выполняемое главным валком, и обжатие ( $s_2$ ), выполняемое валком-оправкой, а также определения соответствующих значений длин очагов деформации  $L_1$  и  $L_2$  с учетом отношения средних давлений в зонах контакта металла с каждым из валков.

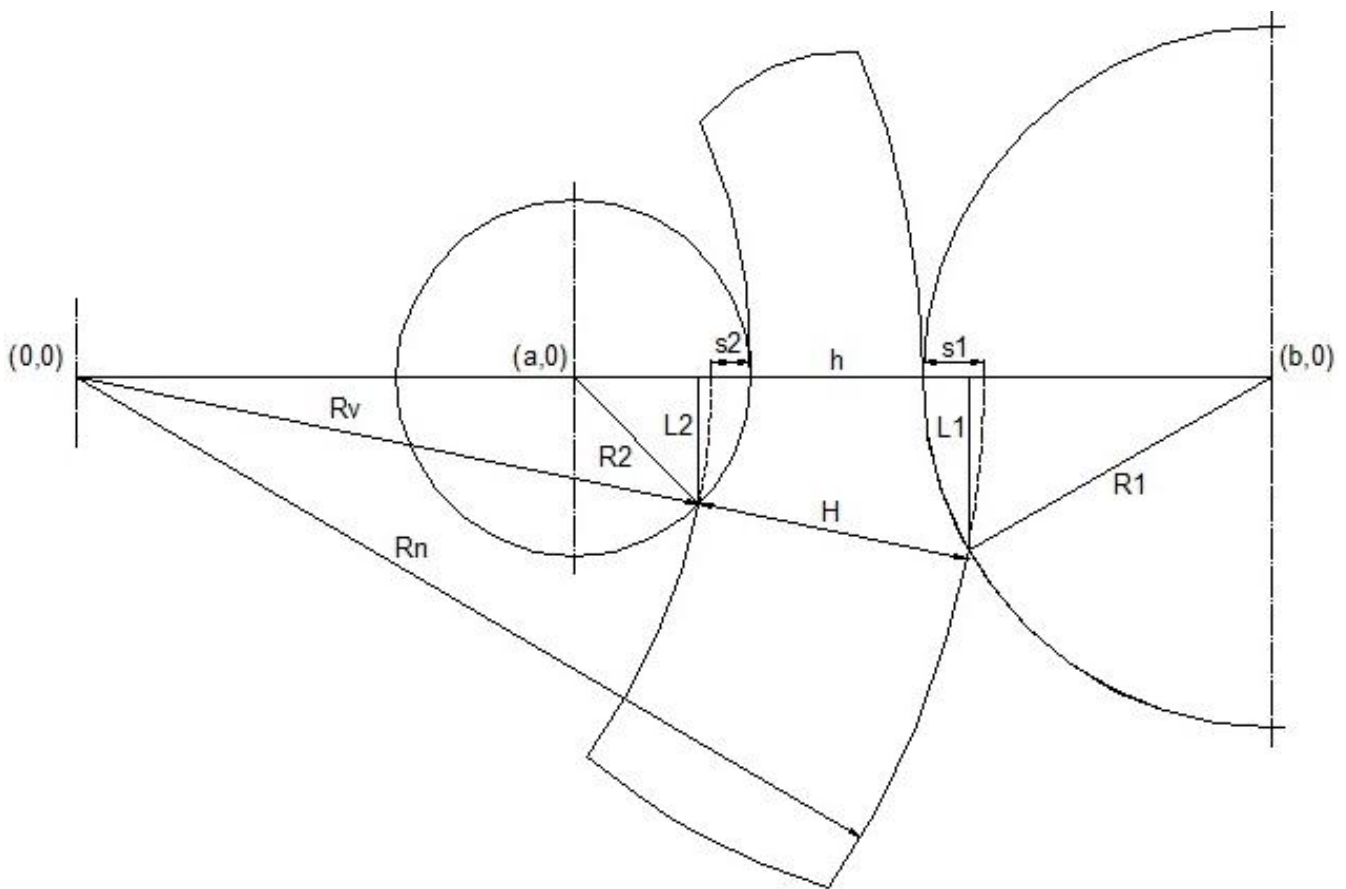


Рисунок 12. Очаг деформации при прокатке кольца в вертикальных валках:

$R_1$  – радиус главного валка;  $R_2$  – радиус валка-оправки;  $R_v$  – внутренний радиус кольца;  $R_n$  – наружный радиус кольца;  $H$ ,  $h$  – толщина кольца на входе и выходе из очага деформации, соответственно;  $s_1$  – обжатие кольца по толщине главным приводным валком;  $s_2$  – обжатие кольца по толщине валком-оправкой;  $L_1$  – длина очага деформации в зоне контакта металла с главным приводным валком;  $L_2$  – длина очага деформации в зоне контакта металла с валком-оправкой

Указанная задача решается на базе установленной аналитической зависимости

$$\frac{\sqrt{R_n^2 - \left(\frac{R_n^2 - R_1^2 + b^2}{2b}\right)^2}}{\sqrt{R_v^2 - \left(\frac{R_v^2 - R_2^2 + a^2}{2a}\right)^2}} = \frac{p_2}{p_1}, (a = R_v - R_2 + s_2, b = R_n + R_1 - s_1), \quad (1)$$

которая раскрывает механизм процесса прокатки прямоугольных в сечении колец в части взаимного влияния геометрических параметров радиального очага деформации ( $s_1, s_2, L_1, L_2, R_1, R_2, R_n, R_v$ ) и средних контактных давлений ( $p_1, p_2$ ), а также соответствующих коэффициентов напряженного состояния ( $n_1, n_2$ ).

Разработаны эмпирические уравнения для расчета коэффициентов напряженного состояния металла в зоне его контакта с главным валком ( $n_1$ ) и валком-оправкой ( $n_2$ ) в виде:

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_3^2 + a_7 x_1 x_2 + a_8 x_1 x_3 + a_9 x_2 x_3 + a_{10} x_1 x_2 x_3, \quad (2)$$

где  $Y = n_1, n_2$ ; константы  $a_0 - a_{10}$  определены на базе метода наименьших квадратов;  $x_1$  – степень логарифмической деформации,  $x_2$  – показатель формы очага деформации,  $x_3$  – показатель формы радиального сечения кольца:

$$x_1 = \bar{\varepsilon} = \ln \frac{H}{h}; x_2 = \frac{L_r}{h_{sr}}; x_3 = \frac{b_{sr}}{h_{sr}}; h_{sr} = \frac{(H + h)}{2}; b_{sr} = \frac{(B + b)}{2}, \quad (3)$$

$h_{sr}, b_{sr}, L_r$  – средняя толщина, высота кольца и длина радиального очага деформации.

Массивы коэффициентов  $n_1, n_2$  определяются на базе экспериментальной информации по силам прокатки, используя известные формулы:

$$n_1 = \frac{P}{\sigma \cdot b_{sr} \cdot L_1}; \quad n_2 = \frac{P}{\sigma \cdot b_{sr} \cdot L_2}, \quad (4)$$

где  $P$  – сила прокатки;  $\sigma$  – напряжение течения металла.

Созданы метод и компьютерная программа разработки на базе экспериментальной информации эмпирических уравнений для расчета коэффициентов напряженного состояния металла  $n_1, n_2$ , а также коэффициента плеча силы прокатки  $K_g$ .

В процессе расчета предусмотрена проверка ряда расчетных величин путем сопоставления с соответствующими допустимыми по силе и мощности прокатки, скорости роста диаметра кольца, скорости движения валка-оправки, напряжениям в бочке валка-оправки и выполнение при этом корректировок радиальных и осевых обжатий, что обеспечивает получение графиков скорости роста диаметра кольца, скорости движения валка-оправки, а также графиков сил прокатки в радиальном и осевом очагах деформации, которые необходимы для реализации рационального режима деформации металла при прокатке кольца.

На основе созданной усовершенствованной математической модели процесса прокатки колец разработана специализированная компьютерная программа расчета рационального режима деформации металла при прокатке прямоугольных в сечении колец, а также фасонных в сечении колец, приведенных к соответствующему прямоугольному контуру сечения. Анализ параметров процесса прокатки позволил установить:

- качественный ход расчетных кривых (толщины кольца и его наружного диаметра, скорости роста наружного диаметра кольца, скорости движения валка-оправки), силы и момента прокатки соответствует экспериментальным кривым.

- средние отклонения расчетных величин от экспериментальных по толщине и наружному диаметру кольца не превышают 2% и 1% соответственно, по скорости движения валка-оправки – 12%, по скорости роста диаметра кольца – 21% (на основном этапе прокатки 12%), по силе прокатки – 7% (на основном этапе прокатки 5%), по моменту прокатки – 16% (на основном этапе прокатки 7%), что позволяет сделать вывод о возможности использования компьютерной программы на практике для совершенствования технологии прокатки колец.

Разработаны также эмпирические уравнения для расчета показателей уширения металла в радиальном  $K_r$  и осевом  $K_o$  очагах деформации при прокатке колец типа «втулка». Средние отклонения расчетных величин, найденных с учетом уширения металла, от экспериментальных на основном этапе прокатки по текущей толщине кольца не превышают 2%, по текущему обжатию – 8%. Получены графические зависимости показателей уширения от степени логарифмической деформации, фактора формы очага деформации и фактора формы радиального сечения кольца.

Выполнен предварительный расчет режима обжатий металла при прокатке валка колесопрокатного стана на базе соответствующего приведенного прямоугольного сечения с использованием аналитической модели, разработанной в разделе 5, и созданной на ее основе компьютерной программы. Результаты предварительного моделирования получены в виде зависимостей толщины, внутреннего диаметра кольца и скорости роста внутреннего диаметра кольца от времени, а также зависимости силы прокатки от внутреннего диаметра кольца. Эти зависимости использовали для получения результатов уточненного конечно-элементного моделирования процесса прокатки валка колесопрокатного стана.

#### **Шестой раздел «Разработка усовершенствованной технологии штамповки и прокатки колец с наружным гребнем».**

Технологическая схема осадки, штамповки и прокатки фланца с наружным гребнем (главного валка колесопрокатного стана), показана на рисунке 13.

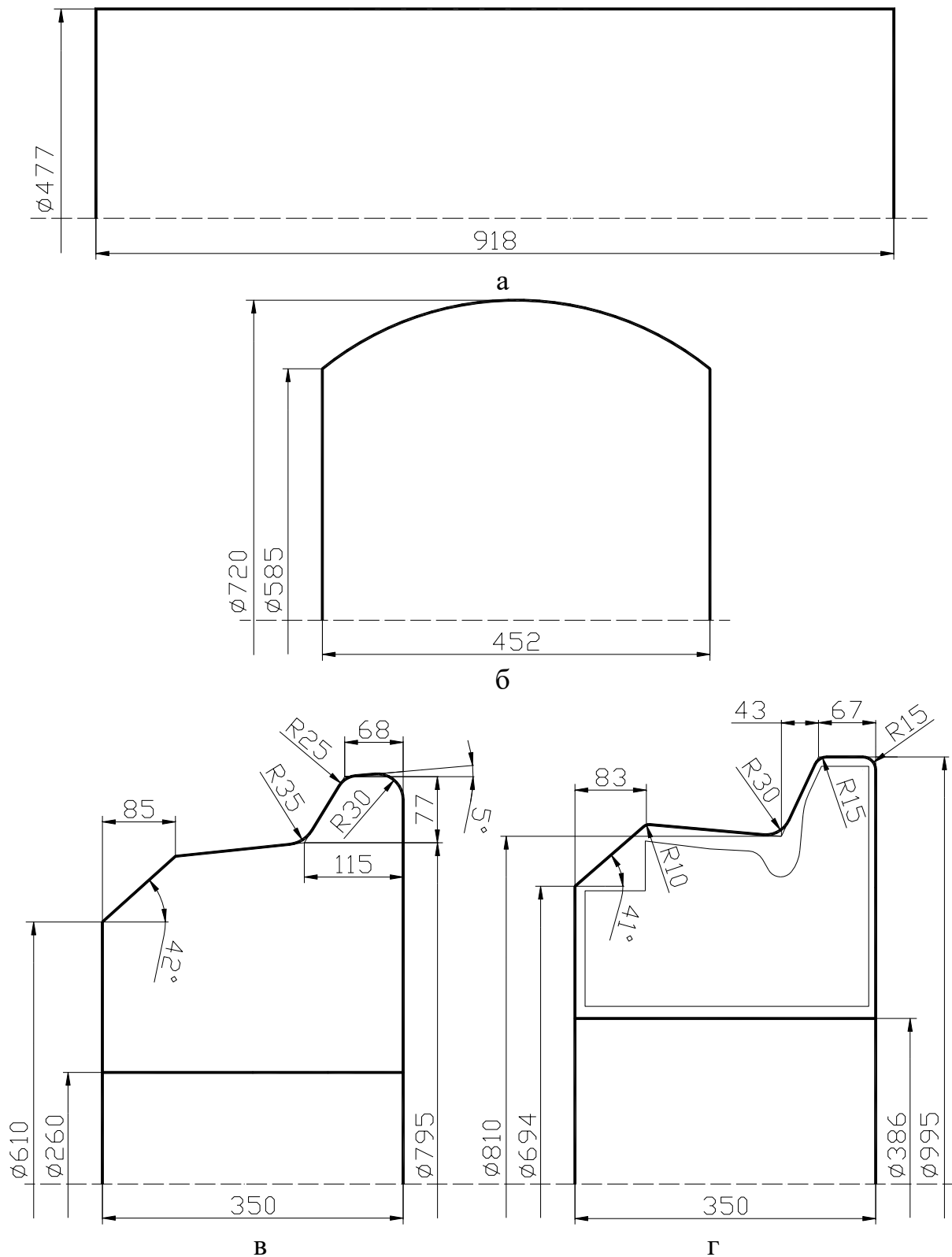


Рисунок 13. Технологическая схема осадки, штамповки и прокатки фланца с наружным гребнем (главного вала колесопрокатного стана), показаны контуры: а – исходной заготовки; заготовок: б – после осадочного пресса; в – после заготовочного пресса; г – фланца после кольцепрокатного стана

Разработка технологической схемы (рисунок 13) выполнена на базе результатов автоматизированного проектирования чистового технологического фланца (ри-

сунок 2), чернового фланца (рисунок 3), калибровок для штамповки и прокатки фланца с наружным гребнем (рисунок 4).

Впервые на базе результатов конечно-элементного моделирования установлен максимально допустимый диапазон изменения отношения средних контактных давлений  $p_2/p_1 \leq (0,25-0,5)$  в радиальном очаге деформации на каждом из оборотов кольца, соответственно, с валком-оправкой и главным валком, в случае его малой раскатки ( $D_0 \geq 0,65D_{\text{зот}}$ ), при котором обеспечивается выкатка наружной поверхности фланца, включая его гребень, на основном этапе прокатки ( $D_m \leq 0,8D_{\text{зот}}$ ) без превышения допустимого значения его внутреннего диаметра ( $D_0, D_m, D_{\text{зот}}$  - соответственно, начальный, текущий и конечный внутренние диаметры кольца при прокатке).

Выполнено конечно-элементное моделирование процесса осадки, штамповки и разгонки кольцевой заготовки с гребнем, разработан режим деформации металла.

Режим обжатия металла при прокатке главного вала колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане определяется разработанными калибровками (рисунки 4, 5) и графиками сил для радиального и осевого очагов деформации (рисунки 14, 15), которые получены путем конечно-элементного моделирования процесса прокатки. Установлено, что имеет место выполнение всех элементов профиля, сила прокатки не превышает допустимое значение, разнотолщинность и овальность фланца плавно уменьшаются на завершающих этапах процесса прокатки, что свидетельствует о правильности и рациональности разработанных калибровки и режимов деформации.

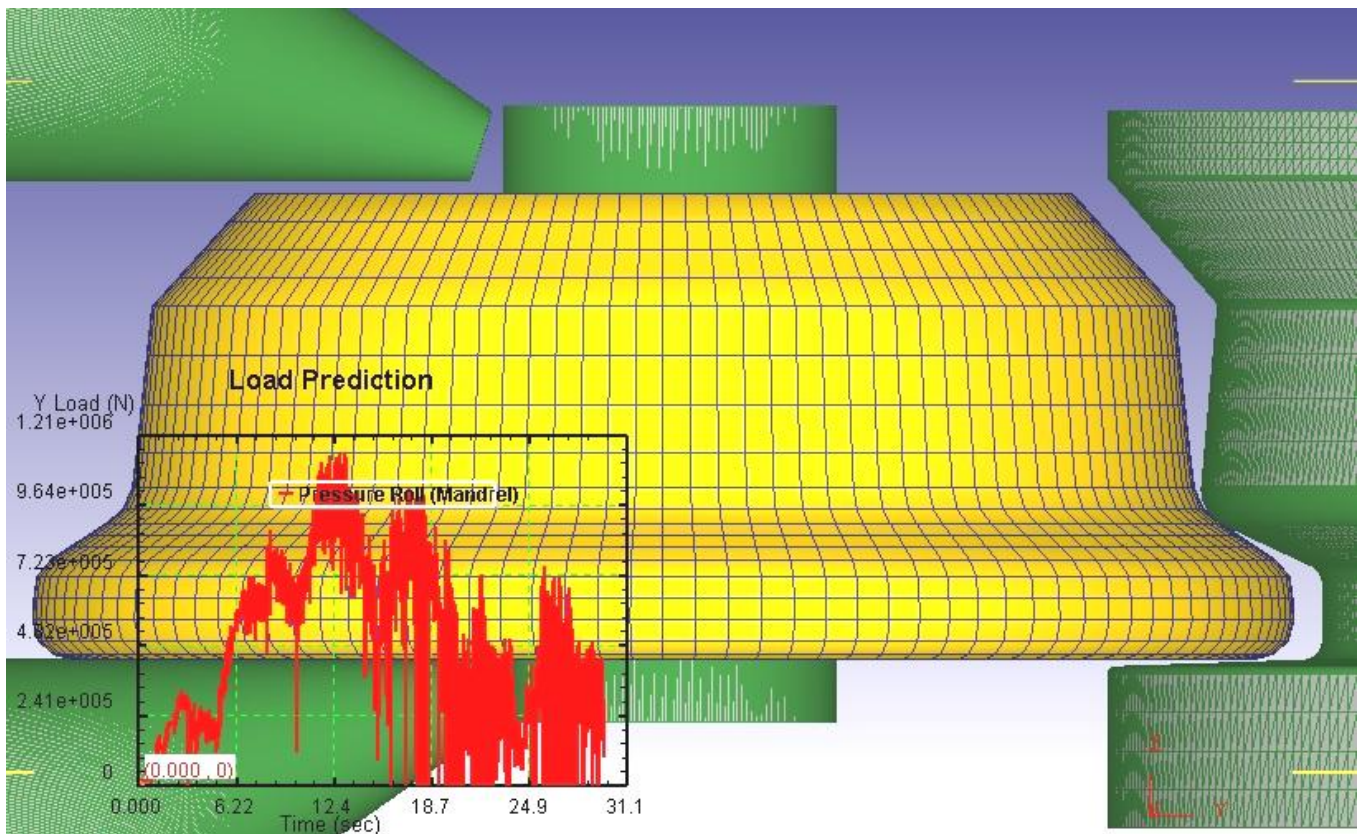


Рисунок 14. Визуализация моделирования процесса прокатки фланца

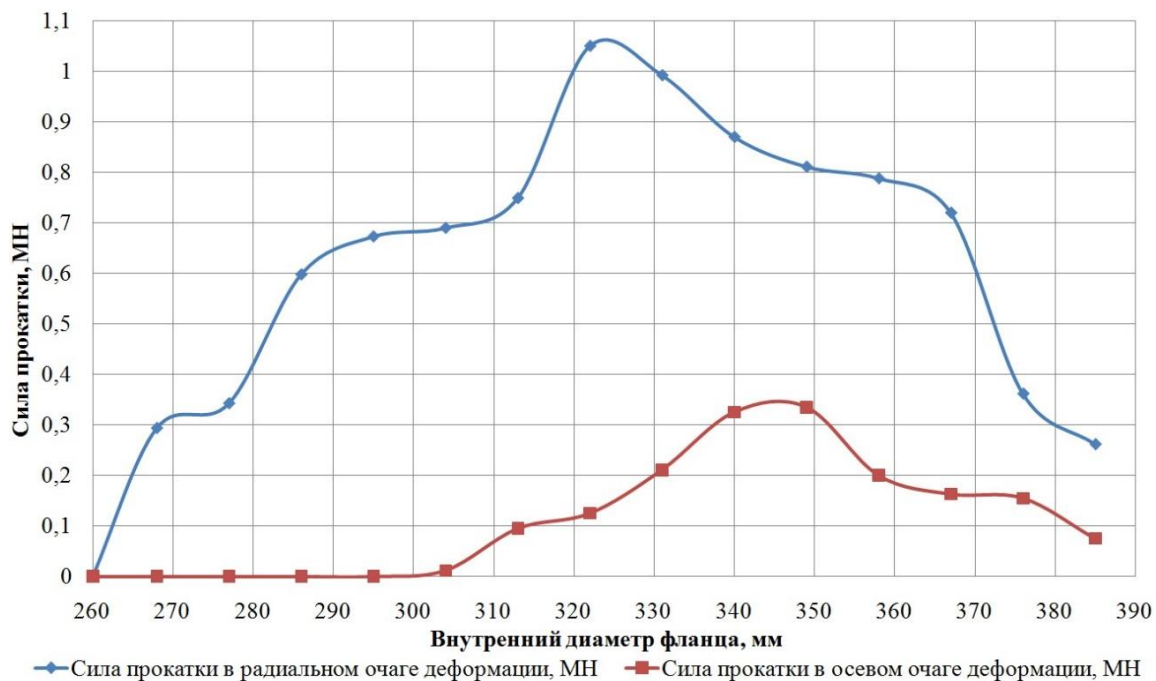


Рисунок 15. Силовой режим прокатки фланца с наружным гребнем

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная **научно-техническая задача**: развития теории процесса прокатки колец; автоматизированного проектирования нового экономичного профиля фланца с наружным гребнем, необходимого для изготовления путем его механической обработки главного валка колесопрокатного стана; разработки усовершенствованной технологии прокатки фланца на радиально-осевом кольцепрокатном стане.

Основные научные и практические результаты работы.

1. Существует важная хозяйственная и научно-техническая задача создания новых экономичных профилей колец и разработки рациональных технологий их штамповки и прокатки. Ее решение в значительной степени связано с имеющимися возможностями автоматизированного проектирования и конечно-элементного моделирования в этой области. Как показал анализ технической литературы актуальное значение имеют исследования, направленные на создание новых экономичных профилей колец, в том числе с наружным гребнем, разработку усовершенствованных математических моделей процессов прокатки, методов расчета энергосиловых параметров и специализированной компьютерной программы расчета рациональных режимов деформации металла. Важное значение имеет автоматизированное проектирование чистовых и черновых фланцев, а также калибровок и режимов деформации металла для штамповки кольцевых заготовок с наружным гребнем и прокатки на кольцепрокатном стане фланцев, необходимых для изготовления из них путем механической обработки главных валков колесопрокатного стана.

2. Выполнено совершенствование метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане, которое заключается в следующем:

– определение напряжения течения металла при конечно-элементном моделировании процесса прокатки колец выполнено на базе зависимости, учитывающей накопленную деформацию и процессы динамического преобразования структуры при горячей прокатке;

– расчеты параметров процесса прокатки колец и выхода на требуемую скорость роста диаметра кольца, реализуемые в системе конечно-элементного моделирования, выполнены аналогично управлению кольцепрокатным станом при решении этой же задачи (выхода на требуемую скорость роста диаметра кольца) при реализации соответствующей прокатки на практике.

3. Выполнены экспериментальные исследования силовых и геометрических параметров процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане. Установлен механизм влияния сил прокатки и, соответственно, скорости роста диаметра кольца, на процессы формоизменения металла на различных этапах прокатки кольца.

4. На базе усовершенствованного метода выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки прямоугольного в сечении кольца типа «втулка» и кольца с наружным гребнем (фланца) на радиально-осевом кольцепрокатном стане. Качественный ход расчетных кривых соответствует экспериментальным. Средние относительные отклонения расчетных величин от экспериментальных не превышают 15%, что позволяет сделать вывод о возможности применения предложенного подхода для изучения закономерностей процесса прокатки колец и совершенствования технологии их прокатки. Анализ полученных результатов также показал, что для режима прокатки кольца с наружным гребнем имеет место повторный рост разнотолщинности и овальности кольца, который связан с интенсивным снижением силы прокатки и, соответственно, ростом неравномерности деформации металла. Режим прокатки, обеспечивающий высокую производительность, характеризуется отсутствием устойчивой тенденции к минимизации разнотолщинности и овальности кольца на завершающей стадии прокатки, что является недостатком. Его устранение (для получения разнотолщинности и овальности кольца менее 0,5–1,0 мм) обеспечивается менее интенсивным снижением силы прокатки и, соответственно, скорости роста диаметра кольца на завершающих этапах прокатки.

5. Впервые на базе результатов конечно-элементного моделирования установлен максимально допустимый диапазон изменения отношения средних контактных давлений  $p_2/p_1 \leq (0,25-0,5)$  в радиальном очаге деформации на каждом из оборотов кольца, соответственно, с валком-оправкой и главным валком, в случае его малой раскатки ( $D_0 \geq 0,65D_{\text{зот}}$ ), при котором обеспечивается выкатка наружной поверхности фланца, включая его гребень, на основном этапе прокатки ( $D_m \leq 0,8D_{\text{зот}}$ ) без превышения допустимого значения его внутреннего диаметра ( $D_0, D_m, D_{\text{зот}}$  – соответственно, начальный, текущий и конечный внутренние диаметры кольца при прокатке).

6. На основе созданной усовершенствованной математической модели процесса прокатки колец разработана специализированная компьютерная программа расчета рационального режима деформации металла при прокатке прямоугольных в сечении колец, а также фасонных в сечении колец, приведенных к соответствующему

прямоугольному контуру сечения. Анализ расчетных параметров процесса прокатки позволил установить:

- качественный ход расчетных кривых (толщины кольца и его наружного диаметра, скорости роста наружного диаметра кольца, скорости движения валка-оправки), силы и момента прокатки соответствует экспериментальным кривым;
- средние отклонения расчетных величин от экспериментальных на основном этапе прокатки не превышают 12%.

7. На базе специализированной компьютерной программы выполнено автоматизированное проектирование контуров сечений чистовых механически обработанного и технологического фланцев, а также чернового фланца, который является разработанным новым экономичным профилем для изготовления из него путем механической обработки главного валка колесопрокатного стана. Также выполнено автоматизированное проектирование калибровок для штамповки заготовок с наружным гребнем и прокатки фланцев на кольцепрокатном стане. Режим обжатия металла при прокатке главного валка колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане определяется разработанными калибровками, а также графиками сил для радиального и осевого очагов деформации, которые получены путем конечно-элементного моделирования процесса прокатки. Показано, что имеет место выполнение всех элементов профиля, обеспечена минимизация разнотолщинности и овальности кольца к концу процесса прокатки, сила и мощность прокатки не превышают допустимые значения. Автоматизация процесса проектирования позволит повысить производительность труда калибровщиков, а также улучшить качество чертежей и штампованно-катаных фланцев.

8. Прокатка главного валка колесопрокатного стана, на кольцепрокатном стане направлена на экономию металла, повышение эффективности производства и увеличение срока службы катаных валков взамен литых. Ожидаемый годовой экономический эффект представляет собой экономию денежных средств от покупки цельнокатаных заготовок главных валков колесопрокатного стана вместо предварительно обточенных литых заготовок. Доля в ожидаемом годовом экономическом эффекте соискателя составит 20% или 631 тыс. руб.

9. Результаты диссертационных исследований, включающие усовершенствованный метод конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане, внедрены в учебный процесс. Автоматизированное проектирование нового экономичного профиля фланца с наружным гребнем, а также математическая модель процесса прокатки прямоугольных в сечении колец, учитывающая уширение металла в радиальном и осевом очагах деформации, и усовершенствованный метод конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка и совершенствование ресурсосберегающих технологий обработки металлом давлением».

10. Направление дальнейших исследований связано с созданием новых экономичных профилей колец с наружным гребнем, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками и обеспечивающих повышение срока эксплуатации изготовленных из них деталей, а также разработкой рациональных технологий их штамповки и прокатки.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях*

1. Метод автоматизированного проектирования профилей механически обработанных бандажей и фланцев / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – 2017. – Том 21, №4 – С. 38-53. *(Автоматизированное проектирование профилей чистовых фланцев).*
2. Метод автоматизированного проектирования профилей фасонных в сечении колец / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – 2018. – Том 22, №1 – С. 10-18. *(Автоматизированное проектирование контуров чистовых механически обработанных колец).*
3. Метод автоматизированного проектирования профилей черновых бандажей и фланцев / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – Том 16, №2. – С.121-127. *(Автоматизированное проектирование профилей черновых фланцев).*
4. Зависимость напряжения течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn, учитывающая при горячей прокатке процессы динамического преобразования структуры / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2020. – Том 19, №1. – С.45-52. *(Обоснование зависимости для расчета напряжения течения стали, учитывающей процессы динамического преобразования структуры при прокатке).*
5. Совершенствование метода моделирования процесса прокатки кольцевых заготовок на радиально-осевом кольцепрокатном стане / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2020. – Том 63, №8. – С. 665-673. *(Адаптация и совершенствование метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец).*
6. Разработка калибровки для прокатки главного вала колёсопрокатного стана на кольцепрокатном стане / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2020. – Том 20, №2. – С.44-52. *(Разработка нового экономичного профиля. Автоматизированное проектирование калибровок для штамповки и прокатки главного вала колёсопрокатного стана, конечно-элементное моделирование процесса).*
7. Яковченко, А.В. Экспериментальные исследования процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане / А.В. Яковченко, **В.В. Пилипенко** // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – 2020. – Том 31, №2. – С. 8-18. *(Подготовка и проведение эксперимента, построение графических зависимостей параметров процесса от времени).*

8. Математическая модель процесса прокатки колец / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Физика и техника высоких давлений. – 2020. – Том 30, №3. – С. 87-102. *(Разработка математической модели процесса прокатки прямоугольных в сечении колец, учитывающей уширение металла в радиальном и осевом очагах деформации).*

9. Метод расчета силы в радиальном очаге деформации при прокатке колец / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Физика и техника высоких давлений. – 2020. – Том 30, №3. – С. 103-113. *(Разработка метода расчета силы при прокатке колец и аналитической зависимости, которая раскрывает механизм процесса прокатки прямоугольных в сечении колец. Разработка зависимостей коэффициентов напряженного состояния в радиальном очаге деформации от степени логарифмической деформации, фактора формы очага деформации и фактора формы радиального сечения кольца).*

10. Закономерности уширения металла в радиальном очаге деформации при прокатке колец типа «втулка» / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – 2020. – Том 32, №3 – С. 8-19. *(Разработка зависимостей показателей уширения в радиальном и осевом очагах деформации от степени логарифмической деформации, фактора формы очага деформации и фактора формы радиального сечения кольца).*

### ***Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций***

11. Метод автоматизированного проектирования калибровок инструмента деформации для штамповки и прокатки фланцев / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Инновационные перспективы Донбасса: тезисы докладов 5-й Межд. науч.-практ. конф., 21-23 мая 2019 г., Донецк. В 6 т. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 98-103. *(Автоматизированное проектирование калибровок для штамповки кольцевой заготовки с наружным гребнем и её прокатки на одном кольцепрокатном стане).*

12. Разработка режимов деформации металла для прокатки главного валка колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Инновационные перспективы Донбасса: тезисы докладов 6-й Межд. науч.-практ. конф., 26-28 мая 2020 г., Донецк. В 6 т. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 98-104. *(Разработка режимов деформации металла для прокатки главного валка колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане).*

13. Технология штамповки и прокатки главного валка колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, **В.В. Пилипенко**, Н.И. Ивлева // Техника и технологии машиностроения: материалы IX межд. науч.-техн. конф., 8-10 июня 2020 г., Омск. – Омск: ОмГТУ, 2020. – С. 51-59. *(Разработка технологии штамповки и прокатки главного валка колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане).*

14. Яковченко, А.В. Экспериментальные исследования силы при нестационарном процессе прокатки фланца с наружным гребнем на кольцепрокатном стане / А.В. Яковченко, **В.В. Пилипенко** // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сб. науч. тр. – 2020. – Том 70, №3. – С. 65-69. (XXVII межд. науч.-техн. конф., 14-20 сентября 2020 г., Севастополь) *(Подготовка и проведение эксперимента, анализ механизма влияния сил прокатки и скорости роста диаметра кольца на процессы формоизменения металла)*.

15. Снитко, С.А. Конечно-элементное моделирование процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане / С.А. Снитко, **В.В. Пилипенко** // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: тезисы докладов V Межд. науч.-технич. конф., 15 октября 2020 г., Алчевск. – Алчевск: ДонГТИ, 2020. – С. 156-159. *(Конечно-элементное моделирование процесса прокатки фланца, анализ полученных результатов по геометрическим и силовым параметрам, а также овальности и разнотолщинности колец)*.