

**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)

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Научный руководитель:

д-р техн. наук, доц. Снитко С.А.

Идентичность всех экземпляров диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ:

Ученый секретарь диссертационного совета Д 01.019.03

д-р техн. наук, проф.



А.В. Яковченко

Донецк – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ, КАЛИБРОВОК И ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ И ПРОКАТКИ КОЛЕЦ .....</b>	
<b>12</b>	<b>12</b>
1.1. Анализ технологии и оборудования для штамповки и прокатки колец .....	13
1.2. Анализ методов проектирования профилей колец и калибровок для их штамповки и прокатки .....	21
1.3. Уровень развития теории и методов исследования процессов штамповки и прокатки колец .....	28
Выводы .....	38
<b>РАЗДЕЛ 2. МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>42</b>
2.1. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец .....	42
2.2. Обоснование математической модели напряжения течения металла .....	44
2.2.1. Зависимость напряжения течения металла, учитывающая процессы динамического преобразования структуры при горячей прокатке .....	44
2.2.2. Анализ точности аппроксимации и экстраполяции экспериментальной информации по напряжению течения металла .....	51
2.3. Методика конечно-элементного моделирования процессов осадки, штамповки и разгонки кольцевой заготовки .....	54
2.4. Методика проведения эксперимента, оценка точности измерения параметров прокатки кольца .....	54
Выводы .....	58
<b>РАЗДЕЛ 3. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ КОЛЕЦ С НАРУЖНЫМ ГРЕБНЕМ И КАЛИБРОВОК ДЛЯ ИХ ШТАМПОВКИ И ПРОКАТКИ .....</b>	
<b>60</b>	<b>60</b>

3.1. Автоматизированное проектирование чистовых механически обработанных или технологических фланцев.....	60
3.2. Автоматизированное проектирование профиля черного фланца – контура сечения валка колесопрокатного стана .....	64
3.3. Автоматизированное проектирование калибровок для штамповки и прокатки валка колесопрокатного стана .....	67
Выводы .....	71
<b>РАЗДЕЛ 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ КОЛЕЦ, ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....</b>	
4.1. Прямоугольные в сечении кольца типа «втулка».....	72
4.1.1. Совершенствование метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане .....	72
4.1.2. Проверка адекватности усовершенствованного метода .....	79
4.2. Кольца с наружным гребнем на примере фланца.....	82
4.2.1. Экспериментальные исследования процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане.....	82
4.2.2. Конечно-элементное моделирование процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане.....	87
Выводы .....	92
<b>РАЗДЕЛ 5. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ КОЛЕЦ.....</b>	
5.1. Математическая модель процесса прокатки колец .....	94
5.2. Метод расчета силы и момента в радиальном очаге деформации при прокатке колец .....	112
5.3. Закономерности уширения металла в радиальном и осевом очагах деформации при прокатке колец типа «втулка» .....	126
Выводы .....	131

<b>РАЗДЕЛ 6. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ И ПРОКАТКИ КОЛЕЦ С НАРУЖНЫМ ГРЕБНЕМ</b> .....	133
6.1. Технологическая схема осадки, штамповки и прокатки главного валка колесопрокатного стана .....	133
6.2. Разработка режимов деформации металла для штамповки кольцевой заготовки с гребнем и прокатки главного валка колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане.....	135
6.2.1. Конечно-элементное моделирование процесса осадки, штамповки и разгонки кольцевой заготовки с гребнем, разработка режима деформации металла .....	135
6.2.2. Предварительный расчет режима обжатий металла на базе аналитической модели .....	139
6.2.3. Конечно-элементное моделирование процесса прокатки валка, разработка режима деформации металла.....	141
Выводы .....	146
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	147
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	151
Приложение А. Окна программы разработки эмпирических формул для расчета коэффициентов напряженного состояния и коэффициента плеча силы прокатки .....	166
Приложение Б. Окна программы расчета режима обжатий металла при прокатке валка колесопрокатного стана, выполненного по соответствующему приведенному прямоугольному сечению на базе аналитической модели .....	177
Приложение В. Документы, подтверждающие эффективность использования результатов работы .....	186

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Специализированные предприятия, как в России, так и за рубежом оснащены заготовочными прессами и кольце-прокатными 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 экономичных 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 колесопрокатного 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 колесопрокатного 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 обработ-

ки 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 ( $D_0 \geq 0,65D_{zom}$ ), при котором обеспечивается выкатка наружной поверхности фланца, включая его гребень, на основном этапе прокатки ( $D_m \leq 0,8D_{zom}$ ) без превышения допустимого значения его внутреннего диаметра ( $D_0, D_m, D_{zom}$  – 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 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.

---

\* Компьютерные программы разработаны Н.И. Ивлевой.

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 колесопркатного 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.

# РАЗДЕЛ 1

## СОСТОЯНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ, КАЛИБРОВОК И ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ И ПРОКАТКИ КОЛЕЦ

Широкому распространению процесса радиально-осевой прокатки кольцевых изделий способствуют высокая производительность, возможность получения точных изделий, высокий коэффициент использования металла и благоприятная микроструктура прокатанных изделий. Сортамент кольцевых изделий включает в себя фланцы, железнодорожные бандажы, кольца подшипников качения, газотурбинных двигателей, зубчатые колёса автомобильных передач, детали атомных реакторов и другие [1,2]. Развитие атомной энергетики, авиа-, судо- и автомобилестроения обуславливает потребность в новых профилеразмерах кольцевых изделий. Расширение сортамента кольцевых изделий, в свою очередь, стимулирует развитие технологии и оборудования кольцепрокатного производства [3-5].

Неотъемлемыми элементами технологии производства штампованно-катаных колец являются калибровки валков и штампов, температурно-скоростные и силовые режимы прокатки, которые определяют частные и суммарные обжаты, необходимые для получения, в первую очередь, размеров кольцевого изделия в заданном поле допусков [6-10], а, в ряде случаев, – требуемого комплекса механических свойств и микроструктуры [11-16].

Уровень проектирования технологии базируется, прежде всего, на достигнутом уровне развития теории процесса прокатки. Поэтому данный раздел посвящен анализу существующей технологии и оборудования для прокатки колец, современному состоянию методов расчета и исследования параметров процессов штамповки и прокатки кольцевых изделий.

## 1.1. Анализ технологии и оборудования для штамповки и прокатки колец

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.

Основная масса цельнокатаных колец (порядка 90 %) имеет наружный диаметр в диапазоне 240 – 890 мм, высоту 70 – 210 мм, толщину 16 – 48 мм [1], однако прокатывают кольца и других размеров [17]. В общем случае простые кольцевые изделия с прямоугольным профилем сечения можно разделить на три группы: шайбы (диски), кольца, втулки (гильзы). Параметры, определяющие принадлежность профиля кольцевого изделия к той или иной группе приведены в таблице 1.1 [18]. Более сложные профили кольцевых изделий тяжелее классифицировать. Так в работе [19] предложена классификация кольцевых деталей авиационных двигателей по способу калибровки, однако и эта классификация не является исчерпывающей [20-22].

Технология изготовления кольцевых изделий в общем случае включает в себя следующие операции: порезка заготовок, их нагрев, осадка на гладких плитах, предварительная формовка с формированием выдавки, окончательная прошивка, прокатка на кольцепрокатном стане [1, 2, 18, 19]. В частных случаях технология может включать в себя дополнительные операции, к примеру, кузнечной раскатки прошитой заготовки на оправке [23]. Это, с одной стороны, увеличивает гибкость производства, с другой – требует определения дополнительных параметров процесса [24, 25].

Порезка заготовок диаметром 100-230 мм осуществляется в штампах или сортовых ножницах с предварительным подогревом до температуры 450 - 800 °С. Достоинством данного способа резки является безотходность, однако порезка заготовок больших диаметров вызывает затруднения даже с учетом предварительного нагрева под резку [18].

Для резки заготовок диаметром более 240 мм используются дисковые пилы и ленточнопильные станки [26, 27]. Осуществление процесса резки в холодном состоянии исключает необходимость предварительного нагрева.

Таблица 1.1. Параметры, характеризующие кольцевое изделие [18]

Тип кольца	Эскиз кольца	Отношение $d_B/d$	Отношение $b/d$
Шайба (диск)		0,5 – 0,65	0,04 – 0,12
Кольцо		0,65 – 0,8	0,12 – 0,25
Втулка (гильза)		0,8 – 0,9	0,25 – 0,45

Однако порезка заготовок осуществляется с отходом металла в стружку. Ширина реза дисковыми пилами 4-11мм, ленточными пилами – 0,6-1 мм [18]. Достоинством данного способа является высокая точность порезки, что обеспечивает минимальный разнорес получаемых заготовок.

Для деформирования кольцевых заготовок под прокатку используются от одного до трех прессов, которые могут отличаться как техническими характеристиками, так и технологическими возможностями. Например, пресс RPH-S 3500 1800/1500 фирмы PRESS TEC силой 10-80 МН [28] снабжен пуансоном и пере-

движным столом. В первой позиции происходит осадка исходной заготовки гладкими плитами и разгонка металла пуансоном с предварительным формированием выдавки. На второй позиции происходит окончательная прошивка заготовки.

Операции осадки, формовки и прошивки могут осуществляться на одном или на нескольких прессах. В случае выполнения всех операций на одном прессе снижается производительность [18].

После деформирования на прессах (прессе) заготовка с центральным отверстием подается на кольцепрокатный стан. В зависимости от конечного профиля и диаметра кольцевых изделий применяют различное оборудование для их прокатки. Для производства колец небольшого диаметра, к примеру, колец подшипников качения, используются автоматизированные кольцепрокатные линии. В состав их оборудования входят радиальные кольцераскатные станы, такие как РМ300 [27] D51, D52 [18, 29] и другие. Следует отметить, что максимальный диаметр кольцевого изделия в этом случае зависит от высоты установки радиального стана вертикального типа (РМ300, D51). Детальнее результаты исследований процесса прокатки на радиальных станах приведены в работах [11, 12, 29-35].

Широкое распространение получил процесс прокатки кольцевых изделий на радиально-осевых станах (рисунок 1.1) [22]. На станах этого типа используются две пары валков, расположенных диаметрально противоположно. Одна пара валков, расположенных вертикально, состоит из главного приводного валка, скорость которого, как правило, поддерживается постоянной в течение процесса прокатки, и холостого прижимного валка-оправки. Вместе они образуют радиальный очаг деформации. Вращение кольца осуществляется за счет крутящего момента главного валка. Основная деформация осуществляется в радиальном очаге деформации. За счет обжатия толщины кольца валком-оправкой диаметр кольца увеличивается.

Вторая пара наклонных конических валков регулирует высоту прокатываемого кольца за счет реализации осевого обжатия. Коническая форма наклонных валков способствует уменьшению скольжения между поверхностью валка и прокатываемым металлом. Для согласования скоростей оба наклонных валка имеют

индивидуальный привод. В ходе процесса прокатки с увеличением диаметра кольца клеть наклонных валков движется в горизонтальном направлении в противоположную сторону движения валка-оправки [1, 2, 18, 19].



Рисунок 1.1. Кольцераскатный стан RAW 2500/1000-7000/3500, разработанный компанией SMS Group для фирмы «Forgiatura Morandini» [22]

Благодаря высокой гибкости процесса, технология прокатки кольцевых изделий на радиально-осевых станах используется практически всеми производителями данного вида продукции, в частности, металлургическими предприятиями Российской Федерации, которые в последнее время активно занимаются модернизацией и обновлением оборудования. Основным поставщиком оборудования при этом выступает компания SMS Group.

Так, в 2008 году на заводе «Уральская кузница» был установлен кольце-прокатный стан RAW 200 (250)/160 (200) – 3500/1000. Важно отметить, что на освоение технологии прокатки профильных колец потребовалось 2 года [36].

В 2010 г. на заводе ПАО «Русполимет» введен в строй стан RAW 400/400 – 6000/12000 [22, 37].

В 2014 на ООО «Уральский металлургический завод» начал работу стан RAW 160/200 – 3000/630 [27, 38].

В период с 2012 по 2015 гг. на предприятии АО «Металлургический Завод «Электросталь» было установлено оборудование фирмы Siempelkamp, пресс силой 200 МН и стан (радиальная и осевая сила 6,3 МН, диаметр прокатываемых колец до 2500 мм, высота до 600 мм), а также стан RAW 400/200 – 3000/600 фирмы SMS Group [23, 39-41].

ПАО "Корпорация ВСМПО-АВИСМА" приобретено две ППЛ линии SMS Group: в 2014 г. пресс PL 8000 и стан RAW 315(400)/200(250) – 5000/610 [42], в 2017 г. пресс PL 8000-V3 силой 80 МН фирмы SMS Meer и стан RAW 400/200-3500/800 DM [43].

Следует отметить, что современные линии SMS Group оснащены программным обеспечением «CARWIN» (Computer Aided Rolling under Windows), которое управляет процессом прокатки, и «ROLLTECH Rings», которое моделирует процесс прокатки кольца и определяет все параметры процесса [22]. Параметры рассчитываются на основании имеющихся в базе данных моделей процесса прокатки.

Оборудование фирмы Siempelkamp располагает аналогичным программным обеспечением SicoRoll [41]. Однако настройка процесса прокатки осуществляется через «Кривую прокатки» – мгновенное соотношение высоты к ширине кольца.

На прессопрокатных линиях (ППЛ) старого типа, введенных в эксплуатацию 80-х годах прошлого столетия, режим прокатки задается через графики скорости роста диаметра кольца (Banning H160S/V125 ПАО «Русполимет»), а также через графики сил прокатки (СК 3000-400У, ПАО «Интерпайп НТЗ»).

Вопросам поиска оптимальных вариантов калибровок, режимов обжатий, температурно-скоростных и силовых режимов прокатки при производстве штампованно-катаных колец публикуется большое количество работ [44-56]. Также проводятся работы, посвященные изучению влияния температуры нагрева исходных заготовок на параметры процесса (включая эволюцию микроструктуры ме-

талла на протяжении всего процесса прокатки) [11-16]. Повышенный исследовательский интерес в данном случае обусловлен, в частности, достаточно широким сортаментом изготавливаемых кольцевых изделий, как по размерам, так и по маркам сплавов, а также постоянным стремлением производителей к повышению технико-экономических показателей, в первую очередь, за счет снижения энерго- и металлоемкости производства.

На сегодняшний день при производстве штампованно-катаных колец наибольшее распространение получил способ порезки слитков на заготовки с помощью дисковых пил, так как обеспечивает стабильность массы исходных заготовок. Это открывает новые возможности по совершенствованию технологии деформирования заготовок на ППЛ в направлении снижения расходного коэффициента металла за счет уменьшения допусков на прокатку и припусков на механическую обработку черновых кольцевых изделий. Причем, следует отметить, что минимизация допусков определяется не только техническими возможностями и состоянием прессопрокатного оборудования, но, во многом, и эффективностью применяемых схем и режимов деформации металла, которые должны обеспечивать стабильность размеров заготовок по всем технологическим переходам ППЛ.

Так, эффективной можно назвать схему штамповки кольцевых заготовок под прокатку на ППЛ ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ», которая была спроектирована Уральским заводом тяжелого машиностроения и пущена в 1987 г. Схема (рисунок 1.2) включает следующие операции:

- свободную осадку исходной заготовки 1 гладкими плитами (пресс силой 20 МН);
- центровку предварительно осаженной заготовки 1 на нижней обжимной плите 2 прессы двойного действия силой 40/20 МН (рисунок 1.2 а) посредством трехрычажного центрователя 3;
- осадку заготовки в закрытом штампе 4 (рисунок 1.2 б) с последующей формовкой пуансоном 5 наметки под прошивку (рисунок 1.2 в);
- центровка заготовки и прошивка центрального отверстия на прессе силой 8 МН.

Благодаря независимому ходу пуансона на прессе силой 40/20 МН гарантированно обеспечивается стабильное заполнение всех элементов штампа (в частности наружного гребня, при его наличии) независимо от типоразмера штампуемой заготовки и колебаний в допустимых пределах ее массы. Кроме того, разгонка пуансоном, выполняемая без снятия рабочей нагрузки с верхнего штампа, существенно снижает асимметрию получаемой заготовки за счет перетекания смещаемого пуансоном металла в менее заполненные углы штампа. Асимметрия в данном случае может вноситься перед деформацией, например, неточной установкой заготовки по оси прессы.

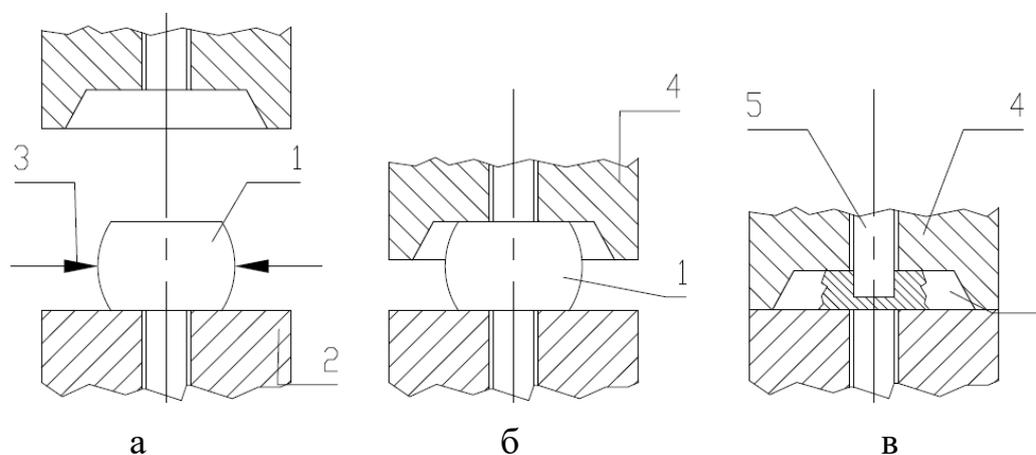


Рисунок 1.2. Схема штамповки кольцевых заготовок на заготовочном прессе двойного действия силой 40/20 МН: а – центровка заготовки; б – осадка заготовки в штампе (верхняя обжимная плита с калибровочным кольцом); в – формирование наметки под прошивку.

Одним из аспектов обеспечения экономии металла и повышения качества продукции металлургического производства является создание экономичных профилей проката, которые по конфигурации максимально близки к готовым изделиям, а также разработка и освоение технологии их изготовления.

Главный валок колесопрокатного стана (рисунок 1.3) является ответственным инструментом деформации, который формирует поверхность катания обода железнодорожного колеса в процессе его прокатки. Соответствующий профиль

валка, по сути, является фланцем с наружным гребнем, который может быть изготовлен на базе процессов штамповки и прокатки.

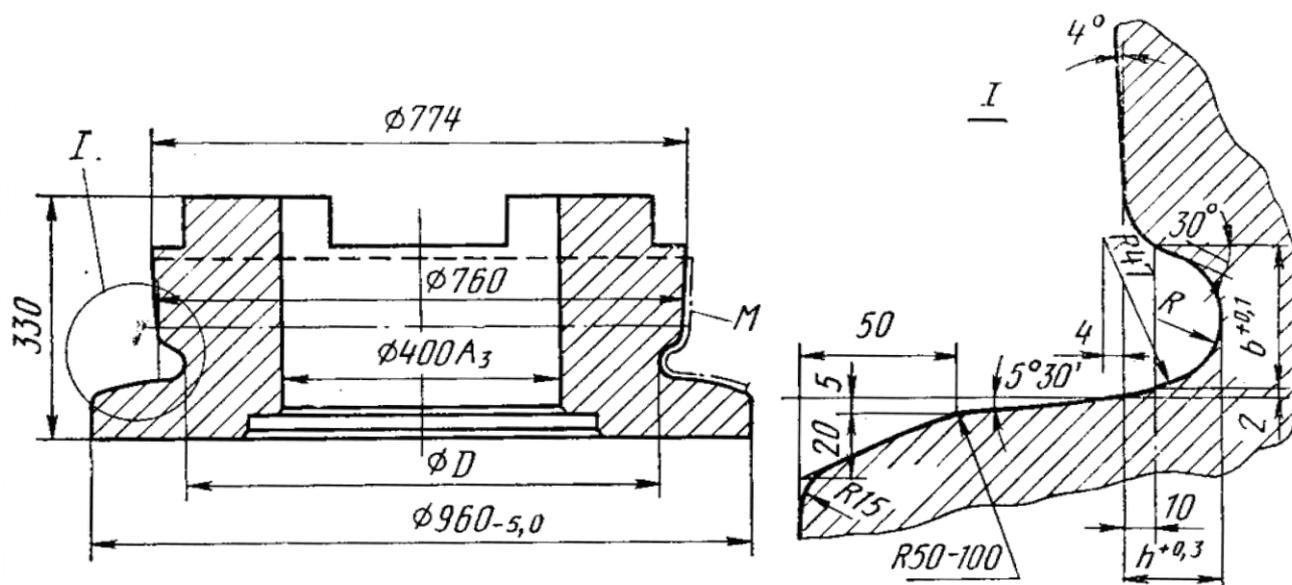


Рисунок 1.3. Главный валок колесопрокатного стана [57]

Известно, что предприятия-изготовители штампованно-катаных железно-дорожных колес получают, как правило, литые или чугунные заготовки главного валка с предварительной механической обработкой.

При этом заготовка валка имеет форму тела вращения с прямоугольными в сечении проточками по наружной боковой поверхности. Фактический припуск на механическую обработку данной поверхности (до получения требуемой формы и размеров рабочей поверхности ручья) превышает 25 - 30 мм на сторону. В результате этого, поверхностный слой металла, имеющий наиболее высокий комплекс механических свойств, полученный в результате термической обработки отливок, практически сразу удаляется в стружку, еще до первой переточки валка.

Поэтому актуальна разработка контура сечения черного фланца с наружным гребнем, который будет максимально приближен к контуру механически обработанного главного валка колесопрокатного стана, что уменьшит припуски на механическую обработку. При этом, по всей видимости, потребуется совершенствование существующих режимов прокатки с тем, чтобы обеспечить выкатку

фасонной наружной поверхности такого фланца (в том числе гребня) при ограниченной раскатке его по внутреннему диаметру.

Закалка прокатанного фланца позволит получить практически равномерную по поверхности катания толщину закалённого поверхностного слоя металла, что обеспечит повышение качества главных валков.

## **1.2. Анализ методов проектирования профилей колец и калибровок для их штамповки и прокатки**

На современных предприятиях широкое применение находят ресурсосберегающие технологии. Экономия металла в значительной степени определяется снижением металлоемкости продукции и повышением точности проката, что обуславливает необходимость создания новых экономичных профилей. Различные типы бандажей (локомотивных, трамвайных) и фланцев составляют значительную часть сортамента кольцевых изделий. Известно, что проектирование чистовых механически обработанных профилей колец необходимо для решения следующих задач. Во-первых, на основе чистовых профилей выполняется проектирование черновых профилей, калибровок, а затем валков и штампов. Во-вторых, чертежи чистовых механически обработанных профилей, а также координаты точек сопряжений и точек скелета соответствующих контуров сечений бандажей и фланцев, координаты точек центров дуг контура и значения радиусов этих дуг, необходимы для программирования современных станков полнопрофильной механической обработки штампованно-катаных кольцевых изделий.

На сегодняшний день проектирование, как сортовых профилей, так и контуров сечений фасонных колец [58-62] часто осуществляют с использованием, например, комплексов Autocad и КОМПАС, путем последовательного ввода команд для вычерчивания отрезков прямых и дуг окружностей, что приводит к кропотливому и длительному труду при достаточно сложных профилях [58, 63, 64]. Подобные комплексы не имеют специализированных программных средств и поэтому не позволяют реализовать процесс автоматизированного проектирования

контуров сечений колец с наружным гребнем, в том числе с учетом требуемой части поля допуска по каждому размеру. Поэтому целесообразно использование специализированных компьютерных программ.

На разработку математических моделей, на основе которых осуществляется сопряжение отрезков прямых с дугами окружностей и дуг окружностей между собой, а также графических пакетов программ проектирования сложных фасонных профилей, направлены работы, выполненные под научным руководством проф. Писаренко Ф.А. [65] и проф. Яковченко А.В. [8]. Они стали основой дальнейших работ по системному автоматизированному проектированию сложных профилей железнодорожных колес широкого сортамента, калибровок валков и штампов [66, 67].

В работе [66] разработан универсальный математический аппарат, на основе которого выполняется сопряжение прямых с дугами окружностей или дуг окружностей между собой и, соответственно, проектируется фасонный профиль. Информация, необходимая для построения профиля, представляет собой линейные размеры элементов профиля, углы, уклоны, радиусы и вносится в специально разработанные окна программы. Расчет координат точек сопряжения контура основан на формулах аналитической геометрии и использует ряд алгоритмов для расчета параметров уравнения прямой и дуги окружности, их взаимное расположение. Что важно – одни и те же алгоритмы применимы для различных профилей. Предусмотрена возможность сохранения информации и передачи её в смежных окнах. На любом текущем этапе проектирования реализована возможность вывода на печать спроектированного контура изделия.

В работе [66] предложено профиль железнодорожного колеса разделить на характерные составляющие его элементы (рисунок 1.4).

Для указанных на рисунке 1.4 элементов разработаны схемы простановки размеров, наиболее часто встречающиеся на практике. Указанные мероприятия позволили разработать компьютерную программу, позволяющую повысить качество проектно-конструкторской документации, снизить трудоемкость расчетных и графических работ.

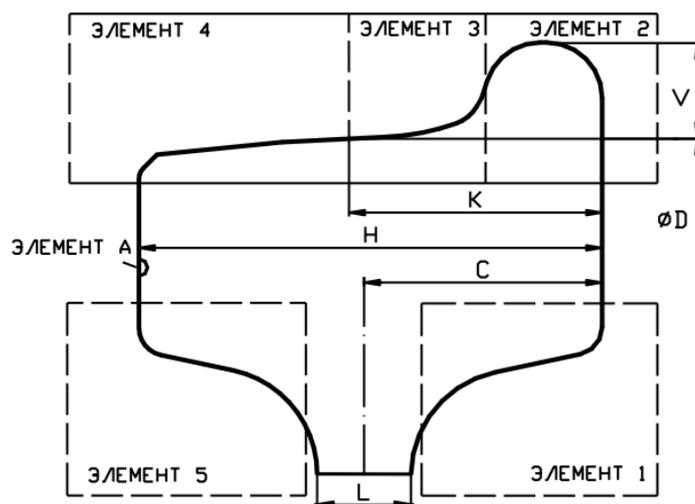


Рисунок 1.4. Пример структуры разделения профиля обода железнодорожного колеса на составные элементы [66]

Предложенные в монографиях [66, 67] подходы использованы для разработки метода и специализированной компьютерной программы автоматизированного проектирования контуров сечений чистовых механически обработанных фасонных в сечении колец (бандажей и фланцев, в частности), в том числе расчета основных параметров кольцевых изделий и контуров их сечений, их контрольное построение, а также вычерчивание [68]. Для этого потребовалось решение задачи создания библиотек элементов, из которых состоят бандажи и фланцы различных типов. Цифровая информация об указанных выше контурах, представленная в виде координат точек сопряжений, координат точек центров дуг и значений радиусов этих дуг, является исходной информацией при проектировании профилей колец с наружным гребнем.

Проектирование черновых профилей колец занимает значительную часть в объеме работ калибровщика при создании технологии их производства. В процессе разработки калибровки вначале на основе контура сечения чистового механически обработанного бандажа или фланца, например, и заданных номинальных припусков выполняется проектирование соответствующего чернового профиля по номинальным размерам. Затем на этой основе разрабатывается контур с учетом требуемой части поля допуска на прокатку по каждому размеру. После учета

температурного расширения металла получают контур, который, по сути, является калибровкой по металлу, который обеспечивает проектирование калибровки валков и соответственно контуров ручьев, нарезаемых в валках. Поэтому, учитывая трудоемкость и важность указанных работ, был создан метод и специализированные компьютерные программы автоматизированного проектирования профилей колец с наружным гребнем [69, 70]. Для этого потребовалась разработка алгоритма решения задачи, в том числе создание схем черновых бандажей и фланцев, моделей окон программы, а также определение порядка ввода исходной информации, вывода результатов расчета и выполненных чертежей. Указанные разработки также выполнены на базе уже имеющихся и используемых на практике наработок в части математических моделей и методов проектирования в области производства железнодорожных колес [66, 67].

В последние годы наблюдается активное развитие методов компьютерного проектирования при разработке технологий обработки металлов давлением [18, 63, 64, 71-74].

Специализированным для условий производства кольцевых изделий является программный комплекс RingRoSi [9], ориентированный на решение комплексной задачи проектирования технологии и процессов производства колец. Комплекс состоит из нескольких модулей, одним из которых является графический редактор для построения контуров валков радиально-осевого стана и заготовки (рисунок 1.5).

Проектирование контуров осуществляется против хода часовой стрелки путем поочередного назначения координат скелетных точек. В окне компиляции, приведенном на рисунке 1.6, спроектированные контуры могут быть объединены для отражения их взаимосвязи. Позиционирование осуществляется в единой системе координат относительно точки (0;0), и все последующие операции моделирования и визуализации относятся к этой точке. В этом же окне происходит назначение сетки поперечного сечения заготовки для дальнейшего процесса моделирования с помощью метода конечных элементов и метода верхней оценки.

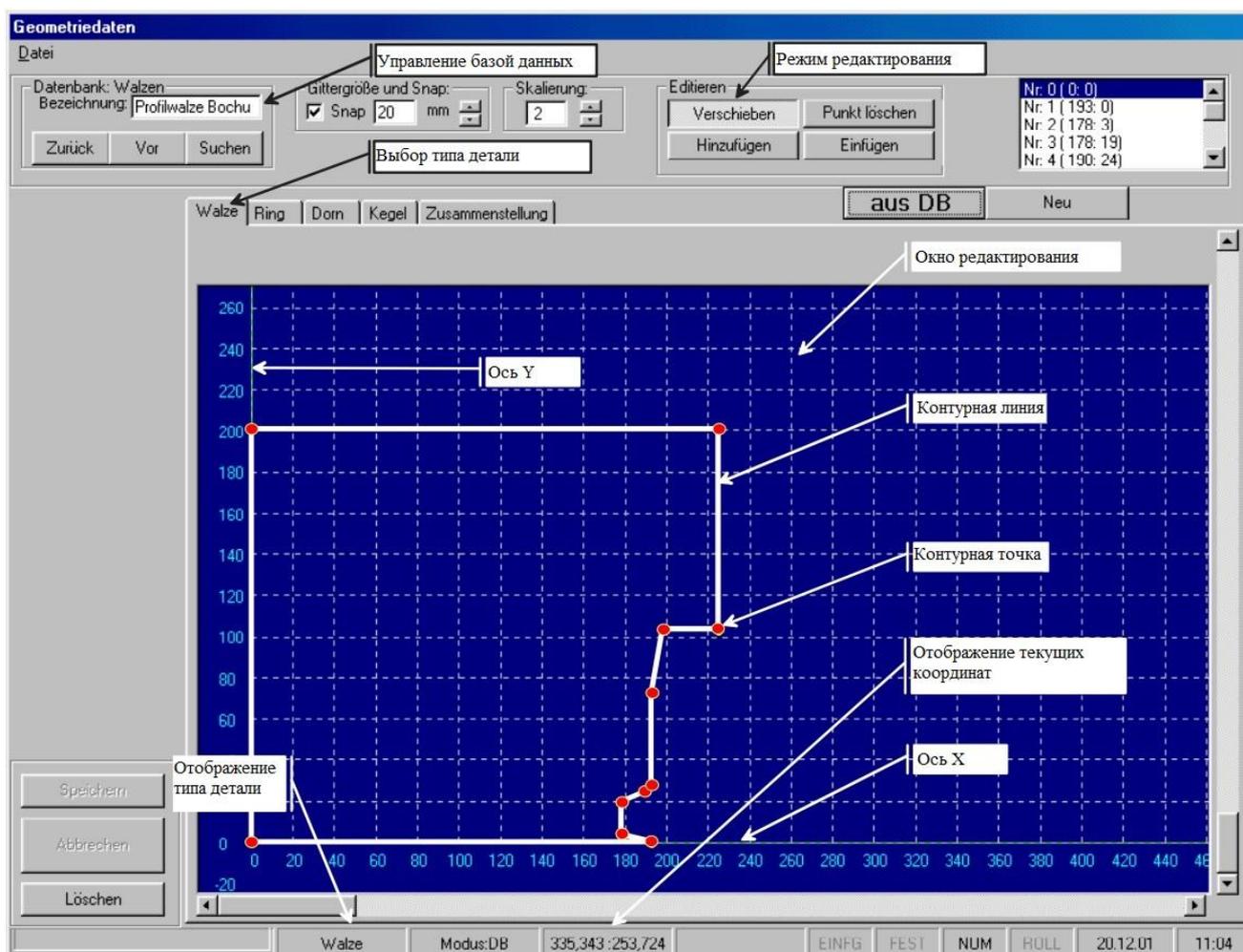


Рисунок 1.5. Редактор геометрии программного комплекса RingRoSi [9]

Особенностью данного программного комплекса является необходимость задания координат скелетных точек, а не линейных размеров и значений радиусов и углов. Это делает процесс проектирования менее производительным, так как построение должно сопровождаться дополнительными расчетами ряда параметров. Существенным недостатком также является отсутствие отображения радиусов скругления элементов профилей в окнах проектирования геометрии, хотя на итоговых чертежах они присутствуют [9]. Отсутствие радиусов не позволяет контролировать заход гребневой части кольца в калибр и, соответственно, - оперативно распознать возможность образования заката [58, 60].

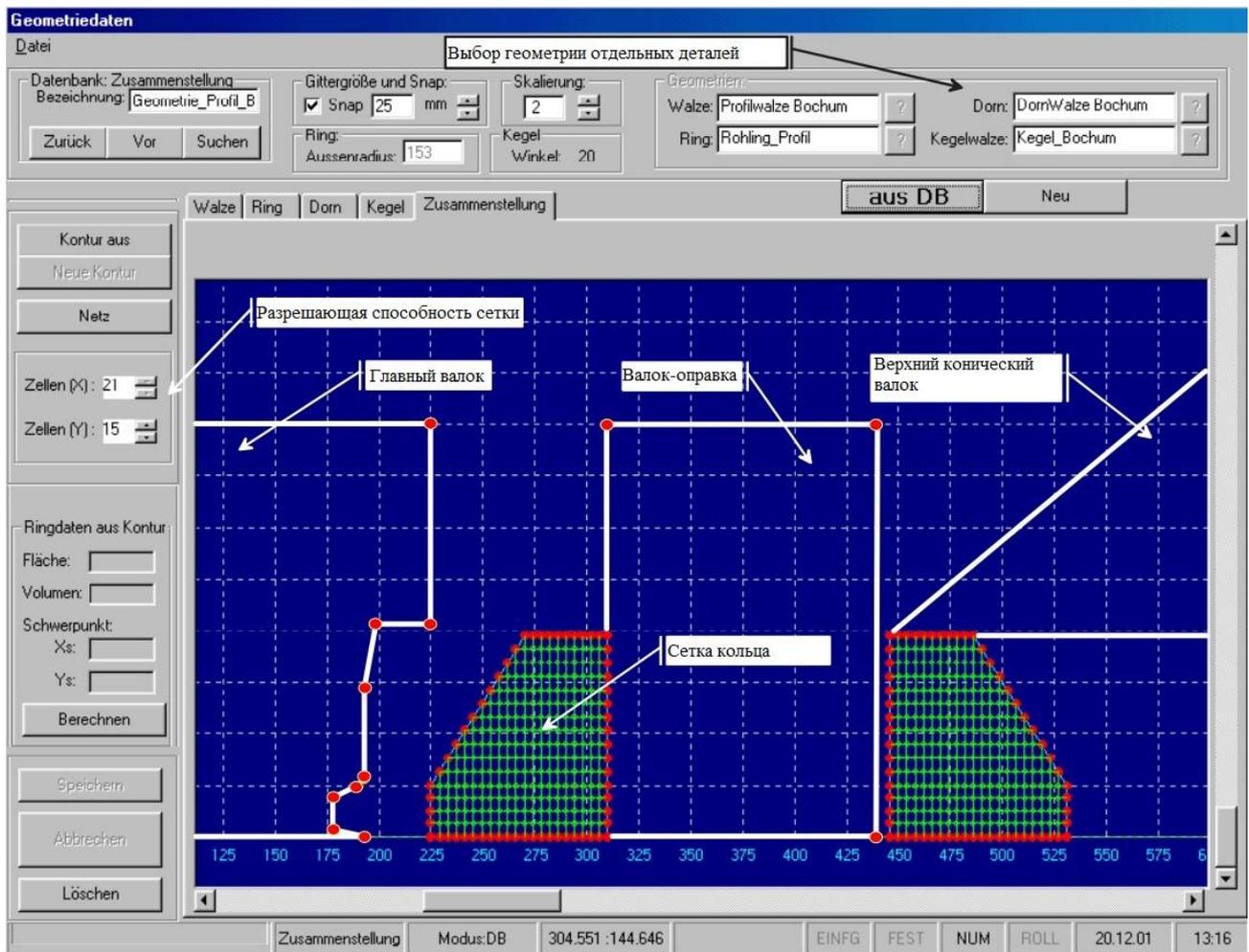


Рисунок 1.6. Окно компиляции геометрии программного комплекса RingRoSi [9]

Подобным функциональными возможностями обладает программное обеспечение «ROLLTECH» [22] и «SicoRoll» [41], которое позволяет выполнить проектирование процесса от штамповки заготовки до готовой продукции, рассчитать параметры протекания процесса при предварительном моделировании. Однако расчет выполняется на основании имеющихся в базе моделей процесса и технологических возможностей оборудования конкретной ППЛ, а вмешательство извне ограничено фирмой-разработчиком [75]. К тому же указанное программное обеспечение поставляется вместе с типовыми, как правило, вводимыми в эксплуатацию новыми ППЛ. Однако до сих пор находятся в эксплуатации и ППЛ старого типа, спроектированные, например, Уральским заводом тяжелого машиностроения. Производители кольцевых изделий на данных линиях, очевидно, также сталкиваются с задачами совершенствования технологии и освоения про-

цессов штамповки и прокатки новых видов колец. Поэтому актуальна разработка и применение, с одной стороны, специализированных для условий кольцепрокатного производства методов и программ проектирования, а, с другой, – не имеющих указанных выше ограничений, обусловленных составом оборудования конкретной линии.

Важным этапом разработки технологии производства кольцевых изделий является проектирование калибровок инструмента деформации [10, 59, 75-81]. Калибровка представляет собой совокупность контуров поперечного сечения заготовок и инструмента деформации по всем переходам ППЛ. При традиционном, «ручном» выполнении работ с использованием систем автоматизированного проектирования типа AutoCAD проектирование контура сводится к поочередному вычерчиванию прямых и дуг окружностей, из которых состоит профиль. Ввиду того, что подобные системы не специализированы для условий кольцепрокатного производства процесс проектирования получается трудоёмким, так как для достижения оптимального варианта калибровки приходится варьировать целый ряд параметров, выполняя сопутствующие этому расчеты и чертежи [63, 64, 71]. К тому же, калибровщиком может быть допущена ошибка, исправление которой в ряде случаев сводится к увеличению припусков на обточку за счет искусственного завышения массы исходной заготовки, что увеличивает расходный коэффициент металла и дополнительно загружает мощности участка токарной обработки.

При разработке калибровок также необходимо учитывать особенности конкретной ППЛ, в частности использование двух или одного кольцепрокатного стана [58-60, 80].

В работах [66, 67] разработаны методы компьютерного проектирования калибровок и окна компьютерных программ, которые являются неотъемлемой частью системы автоматизированного проектирования чистовых и черновых профилей, а также калибровок валков и штампов для производства железнодорожных колес широкого размерного сортамента. Важной особенностью, позволяющей снизить вероятность допущения ошибки, является то, что при разработке калибровок по металлу предусмотрено обязательное их контрольное построение в

специальных окнах программы, где автоматически выполняется совмещение проектируемого контура с тем контуром, на основании которого он проектируется [66, 67].

Размерный сортамент штампованно-катаных колец с наружным гребнем также достаточно широк. Они могут отличаться как по размерам, так и форме. Поэтому целесообразно использование специализированного для условий кольцепрокатного производства методов автоматизированного проектирования калибровок, определяющих во многом режим деформации металла при штамповке и прокатке таких профилей. Такой метод и специализированная компьютерная программа созданы в работе [82] и могут применяться на практике. Данный метод, разработка которого также включала создание моделей окон программы, порядка ввода исходной информации и вывода результатов расчёта, основан на универсальных математических моделях и методах проектирования калибровок, изложенных в работах [66, 67].

### **1.3. Уровень развития теории и методов исследования процессов штамповки и прокатки колец**

Определение рациональных параметров процессов штамповки и прокатки колец при освоении производства новых профилей является актуальной научно-технической задачей. Ее решение непосредственно связано с необходимостью выполнения исследований в части анализа формоизменения металла, температурно-скоростных, силовых и других параметров процесса, которые в совокупности должны обеспечить не только требуемые объёмы кольцевых изделий, но и высокую эффективность производства, и, в конечном итоге, - конкурентоспособность продукции. Поэтому глубина вопросов, освещаемых в публикациях, постоянно растёт. Если раньше вопросы касались преимущественно методов решения задачи, например, прокатки кольцевого изделия (метод конечных элементов, метод верхней оценки, метод плоских сечений, метод линий скольжения), то сейчас с помощью этих методов решаются более сложные задачи оптимизации процесса

и достижению требуемых параметров [83-86]. Так, некогда инновационная Лагранж-Эйлерова постановка задачи (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Technique) теперь является предпочтительным и частым приёмом для облегчения вычислительного процесса [46, 83].

Следует отметить, что совершенствование теории и технологии штамповки и прокатки колец, выполняемое только на основе результатов экспериментальных исследований на сегодняшний день малоэффективно. Наибольшую практическую ценность имеют экспериментальные данные, которые были получены на реальном промышленном оборудовании, так как в этом случае учитываются все (регистрируемые и не регистрируемые) особенности протекания технологического процесса и работы оборудования, которые имеют место в конкретных условиях промышленного производства колец. Однако такие исследования проводят, как правило, при вводе в эксплуатацию новых линий, так как на действующих ППЛ опытные прокатки сопровождаются значительными потерями, как материальных ресурсов, так и рабочего времени. В связи с этим объем экспериментальных исследований на действующих прессопрокатных линиях весьма ограничен [8, 10, 13, 15, 59, 87, 88]. Вместе с тем, для исследования принципиально новых процессов (способов) прокатки колец и, например, возможности получения полигональных колец с переменной толщиной стенки на радиально-осевых кольце-прокатных станах [89] (рисунок.1.7), разрабатываются новые типы установок [4, 5]. На таких установках также отрабатываются системы мониторинга геометрических параметров кольца в течение процесса прокатки [90].

Следует отметить, что при физическом моделировании учитываются лишь те особенности изучаемых процессов и работы оборудования, которые созданы в лабораторных условиях. Поэтому наилучший результат обеспечивают подходы, которые сочетают в себе, например, лабораторные (или натурные) исследования и теоретические, например, метод визиопластичности [9, 89, 91] или метод конечных элементов [15, 32, 34, 46, 49, 51-53, 75, 77-81] (МКЭ).

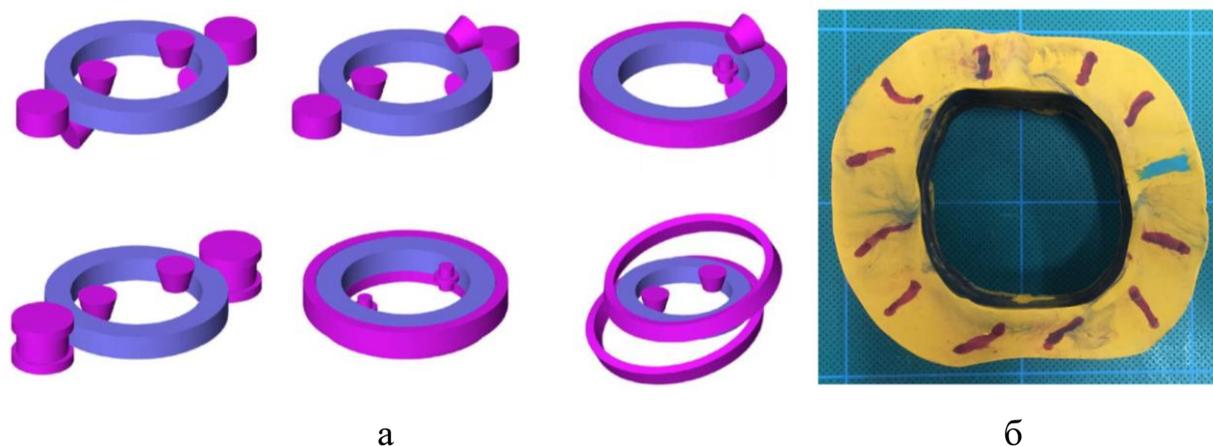


Рисунок 1.7. Результаты исследований по поиску (а) – новых типов установок для производства колец трапециевидного сечения [4] и (б) – способов получения фигурных колец с переменной толщиной стенки [89]

Метод конечно-элементного моделирования является универсальным инструментом, который позволяет, в отличие от натуральных экспериментов, всесторонне исследовать практически любой участок кольцевого изделия на любой стадии его штамповки или прокатки. Кроме того, МКЭ, в сравнение с аналитическими моделями, обладает значительно более широкими возможностями. В современных программных комплексах не возникает непреодолимых трудностей с решением связанной краевой задачи ОМД (нестационарной теплопроводности и пластического течения) при граничных условиях смешанного типа, а также при учете неравномерности напряженного и деформированного состояния металла, связанной с асимметричным формоизменением и неравномерным температурным полем деформируемого металла. Благодаря этому МКЭ на сегодняшний день получил наиболее широкое распространение при анализе нестационарных процессов ОМД, и при штамповке и прокатке кольцевых заготовок в частности [10-13, 15, 29-32, 34, 44, 45, 47-50, 55, 56, 76, 83, 92].

Вместе с тем следует отметить, что, не смотря на универсальность и обширные возможности такого подхода, важнейшим этапом создания модели является адаптация методики конечно-элементного моделирования, включающая учет специфических особенностей предмета исследования. Последнее целесообразно

выполнить на базе соответствующих экспериментальных исследований на натурном объекте.

Этап адаптации методики моделирования во многом определяет корректность и адекватность будущей модели, а, следовательно, и ее научную значимость и практическую полезность. Так, например, наиболее распространенные в теории прокатки методы расчета напряжения течения металла  $\sigma$  созданы для моделирования процессов, в которых степень деформации  $\varepsilon$ , как правило, не превышает 0,5 (соответственно, степень логарифмической деформации не превышает 0,7). Основными из них являются методы В.И. Зюзина [93], В.А. Николаева [94], Л.В. Андреюка [95]. При моделировании процессов горячей прокатки колец, в которых кольцо формируется за несколько оборотов, величина суммарной деформации достигает единицы и более. Использование в этом случае указанных выше методов расчета  $\sigma$  приводит к получению существенно завышенных результатов по силе прокатки, так как они не учитывают разупрочнение металла (рисунок 1.8), связанное с его динамической рекристаллизацией [96, 97].

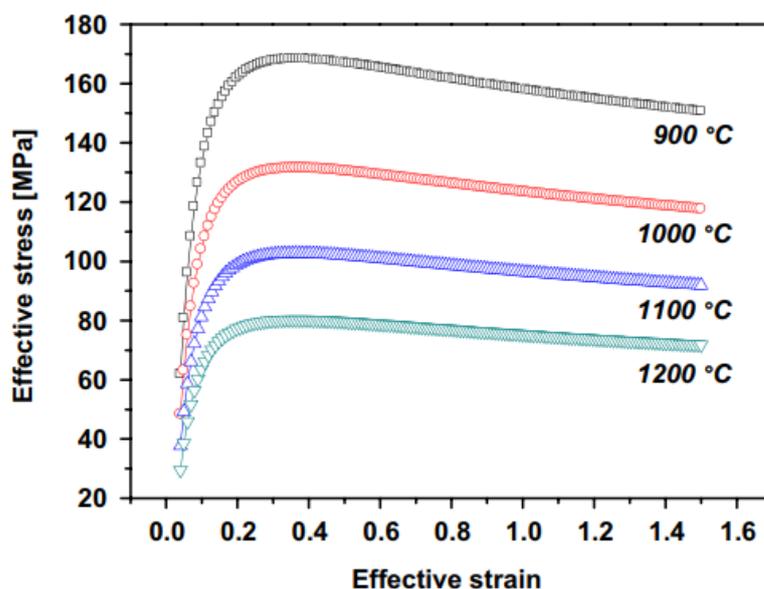


Рисунок 1.8. Напряжение течения стали AISI 1035 при скорости деформации  $10 \text{ c}^{-1}$  [97]

Проведение же горячих тестов сжатия для поиска напряжения течения для решения одной задачи не всегда возможно [96]. Поэтому актуальной является задача определения параметров зависимости для расчета напряжения течения металла на базе теории, в которой учитываются: химический состав стали, температура, скорость деформации, накопленная деформация в рассматриваемой точке очага деформации, а также процессы динамического преобразования структуры металла.

Не менее важным элементом адаптации методики конечно-элементного моделирования прокатки колец является учет того факта, что данный процесс прокатки реализуется, как правило, в несколько характерных этапов (стадий), как указано на рисунке 1.9. На первом осуществляется разгон двигателя главного приводного вала, и, при необходимости, выполняется «сбивка» граней заготовки. На втором этапе реализуется интенсивная раскатка кольца до диаметра, составляющего  $\sim 0,96$  от наружного диаметра готового кольца. На третьем этапе происходит снижение скорости роста диаметра кольца, а на четвертом – калибровка формы и размеров кольца при пониженной скорости роста его диаметра [8].

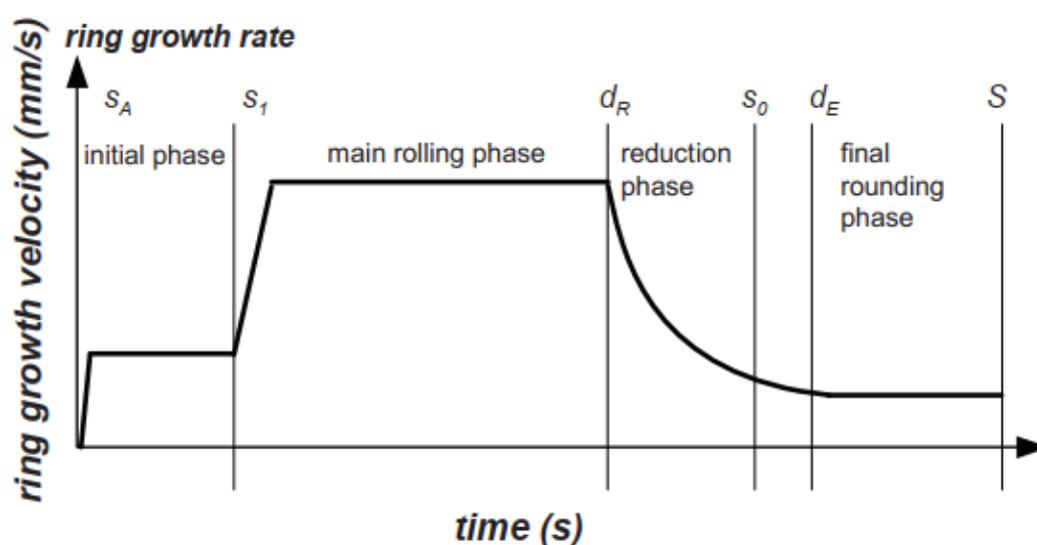


Рисунок 1.9. Этапы процесса прокатки кольца [52]

Разделение процесса прокатки на этапы объясняется методами контроля процесса. Скорость роста диаметра кольца быстро определяется по показаниям положения ощупывающего ролика или бесконтактного устройства, благодаря чему всегда имеется соответствие текущей скорости роста диаметра кольца от текущего значения его диаметра. Другими словами скорость роста диаметра кольца контролируемый параметр, а величины обжатий в радиальном и осевом очагах деформации рассчитываются автоматикой стана для поддержания требуемой скорости роста диаметра кольца [2]. В связи с этим существует актуальная задача совершенствования метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольцевых заготовок с целью обеспечения выполнения расчетов параметров процесса прокатки с учетом выхода на требуемую скорость роста наружного диаметра кольца.

Наряду с указанными выше преимуществами, МКЭ обладает одним существенным недостатком. В зависимости от сложности задачи (размеры исходной заготовки и готового кольца) и настроек расчета (размерность сетки) время моделирования может составлять от нескольких часов до нескольких суток [98]. Это в отдельных случаях может быть и не приемлемо в условиях промышленного производства колец.

Выполнить предварительный расчет параметров процесса осадки заготовки и прокатки кольца позволяют специализированные программные комплексы «ROLLTECH» [22] и «SicoRoll» [41], которые, как было сказано выше, поставляются с типовым прессопрокатным оборудованием. Указанное программное обеспечение позволяет точно воспроизводить режим деформации для ранее изготавливаемых изделий, однако для освоения новых типов профилей требуется разработка новых стратегий прокатки [75]. Как поведет себя кольцо при прокатке по новой стратегии неизвестно, в связи, с чем актуальна разработка алгоритмов прогнозирования возможного искажения формы кольца [53, 99] и повышения стабильности процесса прокатки [51, 99].

В целом, как показал анализ технической литературы, на базе аналитических и численных методов получены решения многих задач в области прокатки

кольцевых изделий [54, 78-80, 84-86]. Нестационарный характер данных процессов прокатки в значительной мере определяет их сложность. В связи с этим имеет место достаточно широкий круг научно-технических задач, которые не утратили своей актуальности [11, 14, 29, 44, 45, 52, 55, 56, 75-79]. Одним из наиболее часто поднимаемых вопросов является определение рациональных графиков скорости движения валка-оправки, скорости роста наружного диаметра кольца [10, 15, 32, 44, 45, 48, 47, 50, 53, 55, 56] и, соответственно, закономерностей изменения радиальных и осевых обжатий, а также уширения металла в процессе прокатки.

Так, например, в работе [30] на основе МКЭ выполнено исследование влияния среднего фактора формы очага деформации на давление и силу прокатки. Фактор формы выражен следующим образом:

$$\bar{G} = \int_0^T \left( \frac{\pi \bar{v}}{n_1} \cdot \frac{1}{1 + R_1 / R_2} \cdot \left( \frac{2R_{a0}h_0}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \right) dt / T, \quad (1.1)$$

$$\bar{v} = \int_0^T v dt / T, \quad (1.2)$$

$$h = h_0 - \bar{v}t, \quad (1.3)$$

где  $T$  – общее время прокатки,  $t$  – переменная времени,  $\bar{v}$  – средняя скорость передвижения валка-оправки в течение времени  $T$ ,  $n_1$  – скорость вращения приводного валка,  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы приводного валка и валка-оправки соответственно,  $h$  – текущая толщина кольца,  $h_0$  – толщина заготовки,  $R_{a0}$  – средний радиус заготовки.

Взаимосвязь фактора формы очага деформации  $\bar{G}$  с давлением прокатки  $p$  выражается зависимостью [30]:

$$p = f(\bar{G}, \sigma), \quad (1.4)$$

где  $\sigma$  – сопротивление металла деформации (напряжение течения).

Полученные в работе [30] графические зависимости, в целом, верно отражают закономерность изменения силы прокатки (рисунок 1.10). Однако полученное соотношение (1.1) не учитывает ширину очага деформации и, соответственно, уширение металла при прокатке.

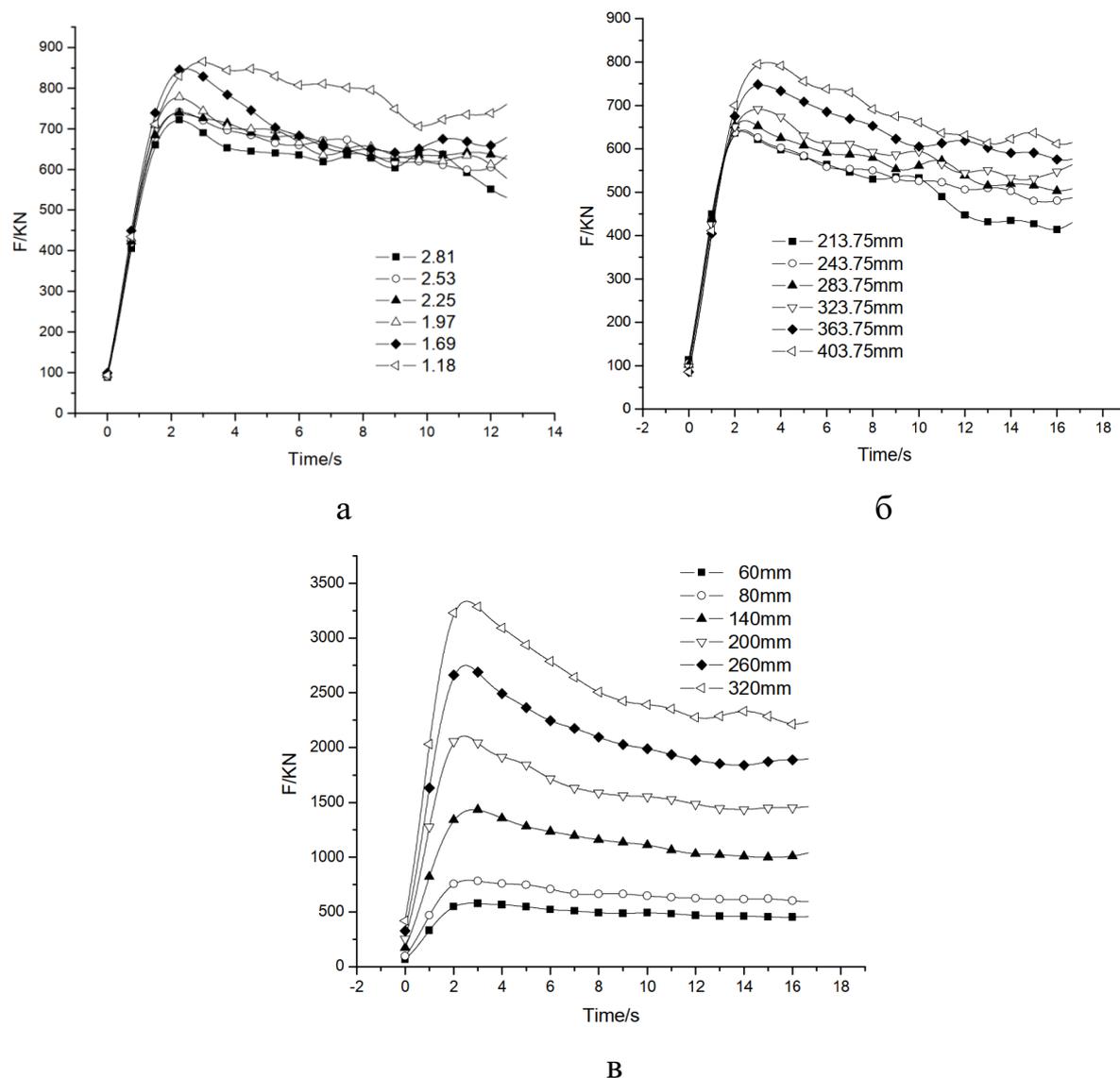


Рисунок 1.10. Зависимость силы прокатки от геометрических факторов:

а – соотношения  $R_1/R_2$ ; б – среднего радиуса заготовки  $R_{a0}$ ;

в – исходной высоты кольца  $b_0$  [30]

Более полно описывают очаг деформации факторы формы,  $\frac{H}{h}$ ,  $\frac{L_d}{h_{cp}}$  и  $\frac{B}{H}$ , использованные авторами работы [100] для исследования уширения металла в

очаге деформации кольцепрокатного стана на основе минимизации функционала полной мощности пластической деформации. Вместе с тем, полученной в работе [100] аналитической модели свойственны недостатки, связанные, прежде всего, с использованием упрощенного кинематически возможного поля скоростей, полученного без учета взаимосвязи геометрических параметров очагов деформации и средних давлений в зонах контакта металла с главным валком и валком-оправкой.

Следует отметить, что допущение о равенстве дуг контакта на главном и приводном валках в теоретических решениях является весьма распространенным [54, 85, 97, 101]. Однако такое допущение довольно грубое, так как на практике параметры очага деформации непрерывно меняются, а равенство дуг контакта наблюдается лишь какое-то мгновение [9,18]. Поэтому учет указанной выше взаимосвязи имеет существенное значение при определении рациональных режимов прокатки колец. Однако, как показал анализ технической литературы, фактор величины обжатий со стороны главного валка и валка-оправки до сих пор мало изучен [19], а представления о соотношении давлений в радиальном очаге деформации требуют дальнейшего развития. С учетом вышеизложенного актуальным является развитие представлений о распределении суммарного обжатия металла вертикальными валками на обжатия, выполненные главным валком и валком-оправкой, а также определения соответствующих значений длин очагов деформации в зависимости от отношения средних давлений в зонах контакта металла с каждым из валков. Очевидна и актуальность разработки на данной основе метода и компьютерной программы расчета энергосиловых параметров прокатки.

Известно, что обжатие кольца в радиальном и осевом очагах деформации приводит не только к увеличению его диаметра, но и к соответствующему увеличению высоты и толщины кольца. Уширение, в свою очередь, может оказывать существенное влияние, и на геометрические параметры прокатываемого кольца, и на стабильность, и на силовые параметры процесса прокатки. Поэтому расчет текущих радиальных и осевых обжатий, а также размеров кольца и других параметров необходимо выполнять с учетом уширения металла в радиальном и осевом очагах деформации.

Также известно, что высота исходной заготовки имеет решающее значение при разработке технологии прокатки [47], а путём подбора необходимого соотношения высоты заготовки к ее толщине кольца можно добиться, например, минимизации энергозатрат при прокатке [30, 47]. Несмотря на это, в научной литературе уширение часто рассматривается как дефект формы поперечного сечения [47, 49, 97, 102], либо же им вовсе стараются пренебречь для упрощения решения задачи [8, 103-105].

Так, в работе [103] предложена аналитическая методика системного расчета основных параметров процесса прокатки в радиальном очаге деформации от заготовки до готового кольца. Предложены универсальные зависимости и алгоритмы расчета параметров исходной заготовки для профилей различной конфигурации [103]. Развитие данной методики выполнено в работе [104], в которой реализована возможность расчета текущих значений диаметра кольца, его толщины, а также параметры профиля поперечного сечения в течение процесса прокатки в зависимости от величины обжатия. Также учтено влияние сложности профиля поперечного сечения на скорость увеличения диаметра [104].

В [105] предложена методика расчета суммарных степеней деформации для случаев, когда кольцевая заготовка прокатывается на двух станах, либо на одном стане, но за несколько переходов.

В работе [8] предложена математическая модель расчета параметров процесса раскатки колец, разработанная на базе аналитических методов моделирования нестационарных процессов ОМД [101]. На основе данной модели создана компьютерная программа, в которой предусмотрено деление процесса прокатки на четыре этапа [8], как это показано на рисунке 1.9. Управляющим фактором является, либо условие постоянства скорости роста наружного диаметра кольца, либо условие постоянства силы прокатки на основной стадии прокатки. Для осуществления бездефектной прокатки реализовано выполнение условия равенства вытяжек в радиальном и осевом очагах деформации. Программа позволяет рассчитать силу, скорость роста наружного диаметра кольца, толщину и высоту кольца, а также график движения валка-оправки, обеспечивающий режим дефор-

мации. Реализована проверка по недопущению превышения ряда допустимых величин по силе и мощности прокатки, напряжениям в оправке, скорости роста диаметра кольца. Предусмотрено сохранение и редактирование расчетной информации в электронной библиотеке программы [8].

Общим достоинством математических моделей и алгоритмов, приведенных в [8, 103-105] является, прежде всего, их универсальность и быстрота вычислений, реализуемая при программной реализации моделей [8]. В качестве же общего недостатка можно выделить то, что все эти модели справедливы для тех случаев, когда высота заготовки равна высоте готового кольца, а уширением металла можно пренебречь. Поэтому актуально разработать математическую модель процесса прокатки колец, а на ее основе – компьютерную программу, которая позволит определять рациональный режим деформации металла при прокатке колец, имеющих высоту, равную, больше или меньше высоты исходной кольцевой заготовки. Также необходимо обеспечить определение текущих радиальных и осевых обжатий, размеров кольца, скорости роста его диаметра, скорости движения вала-оправки и других параметров с учетом уширения металла в радиальном и осевом очагах деформации.

### **Выводы**

1. Проектирование фасонных чистовых и черновых профилей штамповано-катаных кольцевых изделий, осуществляемое в универсальных системах автоматизированного проектирования, например, Autocad и КОМПАС, приводит к кропотливому и длительному труду при достаточно сложных профилях. Поэтому целесообразно использовать специализированные компьютерные программы автоматизированного проектирования профилей чистовых (механически обработанных) и черновых (с припусками на механообработку) колец, в том числе с учетом требуемой части поля допуска по каждому размеру, припусков по элементам профиля и температурного расширения металла. Это позволит снизить трудоемкость расчетных и графических работ.

2. Специализированными для условий производства штампованно-катаных кольцевых изделий являются программные комплексы RingRoSi, «ROLLTECH» и «SicoRoll», которые ориентированы на решение комплексной задачи проектирования технологии от штамповки заготовки до готовой продукции, а также расчет параметров протекания процесса при предварительном моделировании. При этом расчеты в них выполняются на основе имеющихся в базе моделей процесса для конкретного состава оборудования, а любые дополнения и изменения системы ограничены фирмой-разработчиком. Вместе с тем до сих пор находятся в эксплуатации прессопрокатные линии старого типа, спроектированные, в частности, Уральским заводом тяжелого машиностроения. Поэтому целесообразно использование, с одной стороны, специализированных для условий кольцепрокатного производства методов автоматизированного проектирования калибровок, определяющих во многом режим деформации металла при штамповке и прокатке таких профилей, а с другой, – не имеющих указанных выше ограничений, обусловленных составом оборудования конкретной линии. Это обеспечит получение наиболее рационального варианта калибровки без увеличения времени и трудоемкости разработки, а также сократит количество опытных прокаток при освоении технологии производства новых видов колец.

3. Специализированные программные комплексы, типа «ROLLTECH» и «SicoRoll», поставляемые только в комплекте с типовым оборудованием новых прессопрокатных линий, позволяют точно воспроизводить режим деформации ранее изготавливаемых изделий. Однако для освоения новых типов профилей требуется разработка новых стратегий прокатки, эффективность которых не гарантирована.

4. Как показал анализ технической литературы, на базе аналитических и численных методов получены решения целого ряда задач в области прокатки кольцевых изделий. Нестационарный характер данных процессов прокатки в значительной мере определяет его сложность. В связи с этим имеет место достаточно широкий круг научно-технических задач, которые не утратили своей актуальности. На сегодняшний день метод конечно-элементного моделирования получил

наиболее широкое распространение при анализе процессов штамповки и прокатки кольцевых заготовок. Несмотря на универсальность и широкие возможности такого подхода, важнейшим этапом создания модели является адаптация методики конечно-элементного моделирования, включающая учет специфических особенностей предмета исследования и проверку ее адекватности. В связи с этим актуально разработать компьютерную программу автоматизированного определения параметров зависимости для расчета напряжения течения металла с учетом процессов динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке. Также требуется обеспечить возможность автоматизированного выполнения расчетов параметров процесса прокатки с учетом выхода на требуемую скорость роста наружного диаметра кольца, а также провести соответствующие экспериментальные исследования на натурном объекте.

5. Существенным недостатком МКЭ является то, что в зависимости от сложности задачи и настроек расчета время моделирования процессов прокатки колец может составлять от нескольких часов до нескольких суток, что может быть и неприемлемо в условиях промышленного производства колец, так как в ряде случаев корректировку режима прокатки необходимо выполнять оперативно.

6. Общим достоинством аналитических математических моделей процессов прокатки колец является, прежде всего, их универсальность и быстрота вычислений, реализуемая при программной их реализации. В качестве характерного недостатка для известных моделей можно выделить то, что большинство из них справедливы для тех случаев, когда высота заготовки равна высоте готового кольца, и уширением металла можно пренебречь. При этом уширение в ряде случаев может оказывать существенное влияние, и на геометрические параметры прокатываемого кольца, и на стабильность и силовые параметры процесса прокатки. Поэтому актуально разработать математическую модель процесса прокатки колец, а на ее основе - компьютерную программу, которая позволит определять рациональный режим деформации металла при прокатке колец, имеющих высоту, равную, больше или меньше высоты исходной кольцевой заготовки.

Также необходимо обеспечить определение текущих радиальных и осевых обжатий, размеров кольца, скорости роста его диаметра, скорости движения валкооправки и других параметров с учетом уширения металла в радиальном и осевом очагах деформации.

7. Существенным недостатком известных аналитических моделей является довольно грубое допущение о равенстве дуг контакта на главном валке и валкооправке. Из практики известно, что параметры очага деформации непрерывно меняются, а равенство дуг контакта наблюдается лишь какое-то мгновение. Поэтому учет указанной выше взаимосвязи имеет существенное значение при определении рациональных режимов прокатки колец. Следовательно, актуальным является развитие представлений о распределении суммарного обжатия металла вертикальными валками на обжатия, выполненные главным валком и валкооправкой, а также определения соответствующих значений длин очагов деформации в зависимости от отношения средних давлений в зонах контакта металла с каждым из валков. Актуальна разработка на данной основе метода и компьютерной программы расчета энергосиловых параметров прокатки.

8. 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 главных валков колесопркатного стана.

## РАЗДЕЛ 2

### МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 2.1. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец

Моделирование процесса прокатки колец на кольцепрокатном стане реализовано в программной среде DEFORM 3D. Построение модели осуществляли в шаблоне Ring Rolling, который является специализированным модулем, разработанным для решения указанных задач [49, 79, 106, 107].

В процессе моделирования использовали главный приводной валок – 1, валок-оправку – 2, конические валки – 4. Учтено также влияние центрирующих роликов – 5, что исключило отклонение оси кольца 3 при его прокатке от оси прокатного стана (рисунок 2.1).

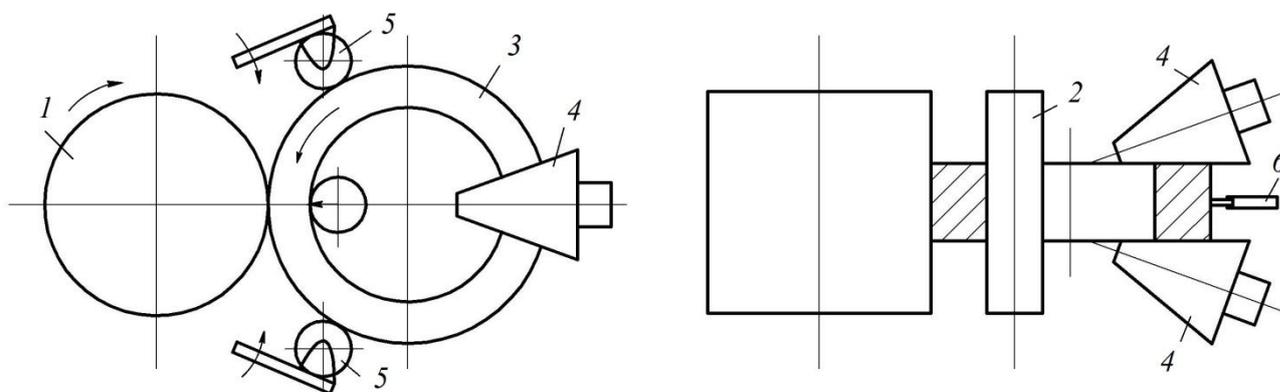


Рисунок 2.1. Схема радиально-осевого кольцепрокатного стана: 1 – главный приводной валок; 2 – валок-оправка; 3 – прокатываемое кольцо; 4 – конические валки; 5 – центрирующие ролики; 6 – устройство для измерения диаметра кольца

При проектировании сетки заготовки использовали функции «однородной толщины слоя в окружном направлении» и «грубой внутренней сетки». Боковая поверхность заготовки образована прямоугольными элементами размером

8x3,25 мм, что позволило достаточно точно описать её криволинейную боковую поверхность (рисунок 2.2).

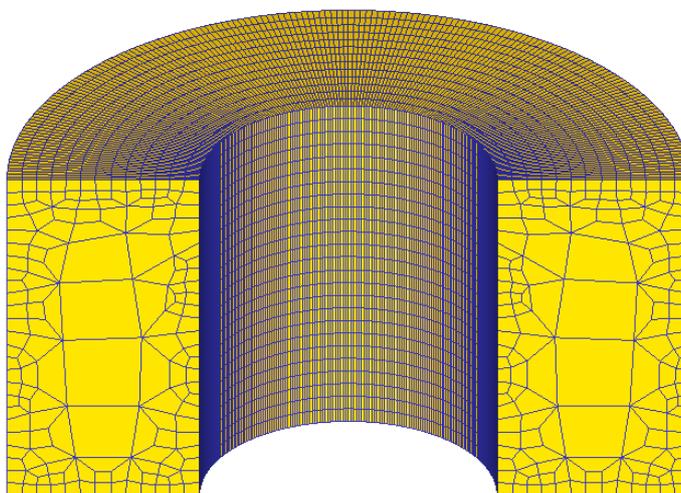


Рисунок 2.2. Объемная сетка кольцевой заготовки

Для кольцевой заготовки использовали пластическую модель материала. В качестве материала использовали углеродистую конструкционную сталь 45, для которой параметры, характеризующие теплофизические свойства, взяли из базы данных DEFORM 3D. Температура окружающей среды  $t_{окр}$  и коэффициент конвекции  $\alpha_k$  были приняты постоянными и равны 20 °С и  $20 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ С}$  соответственно.

Поведение материала заготовки в процессе решения описывали на базе диаграммы «напряжение течения - деформация». В компьютерной программе напряжения и деформации, используемые в указанной диаграмме, являются эквивалентными напряжения или напряжениями по Мизесу  $\sigma$  и эквивалентными деформациями  $\varepsilon$ .

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.

В подразделе 2.2 нами обоснована целесообразность использования для конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , разработанной на базе теории [108].

Для валков выбран недеформируемый тип материала. Дополнительно указаны: направление перемещения, тип зависимости и закон перемещения валка; координаты оси вращения валка, тип зависимости и закон вращения валка. Температура главного валка  $t_{2л.в} = 100^{\circ}C$ , валка-оправки  $t_{в-опр.} = 200^{\circ}C$ , наклонных валков  $t_{накл.в} = 150^{\circ}C$ . Коэффициент теплопередачи  $\alpha_m = 1000 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^{\circ}C}$ . В качестве модели контактного трения принята сдвиговая модель (показатель сил трения был равен 0,7).

## **2.2. Обоснование математической модели напряжения течения металла**

### **2.2.1. Зависимость напряжения течения металла, учитывающая процессы динамического преобразования структуры при горячей прокатке**

При разработке рациональных технологических процессов горячей прокатки колец важными вопросами являются расчеты деформированного состояния металла и энергосиловых параметров. Напряжение течения металла  $\sigma$  является одной из главных составляющих по степени влияния на результаты таких расчетов. Основой при определении напряжения течения металла является экспериментальная информация, которая в большинстве случаев представлена в технической литературе в виде кривых  $\sigma = f(\varepsilon, U, T)$ , то есть в зависимости от степени деформации  $\varepsilon$  (или  $\bar{\varepsilon}$  – степени логарифмической деформации), скорости деформации  $U$  температуры  $T$  [109, 93]. Известные методы расчета напряжения течения металла  $\sigma$  созданы для моделирования процессов, в которых степень деформации  $\varepsilon$ , как правило, не превышает 0,5. Основными из них являются методы: В.И. Зюзина [93], В.А. Николаева [94], Л.В. Андреюка и др. [95].

Теоретические исследования процессов прокатки колец показали, что накопленная деформация за один технологический переход в отдельных элементах профиля может достигать единицы и более.

Известно, что использование известных методов расчета напряжения течения металла  $\sigma$  в зависимости от степени деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $U$  температуры  $T$  при увеличенных значениях степени деформации (превышающих  $\varepsilon = 0,5$ , а  $\bar{\varepsilon} = 0,7$ ) в основном приводит к получению существенно завышенных результатов [110]. Это объясняется тем, что в процессе экстраполяции значений  $\sigma$  в направлении повышения степени деформации не учитывается разупрочнение металла, связанное с его динамической рекристаллизацией.

В работе поставлена задача определения на первом этапе параметров зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$  на базе теории [108], в которой учитываются химический состав углеродистых сталей, температура, скорость деформации, накопленная деформация в рассматриваемой точке очага деформации, а также процессы динамического преобразования структуры металла в процессе его горячей прокатки. На втором этапе планируется проверка адекватности указанной зависимости, необходимой для выполнения конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец.

Параметры указанной зависимости разработаем для стали, имеющей следующий химический состав, %:  $C(0,19)$ ;  $Si(0,2)$ ;  $Mn(0,4)$ ;  $Cr(0,11)$ ;  $P(0,019)$ ;  $S(0,011)$ ;  $Cu(0,16)$ . Выбор этой стали связан, во-первых, с необходимостью конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец из углеродистых марок сталей и, во-вторых, в связи с имеющимися в работе [111] для указанного химического состава стали экспериментально полученных кривых упрочнения, причем в достаточно широком диапазоне изменения степени деформации  $\bar{\varepsilon}$  (true strain), равном 0,02-1,65. В работе [111] принято следующее обозначение: сталь 0,19C-0,20Si-0,40Mn, которое и будет использоваться в дальнейшем.

Экспериментальные кривые течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn [111] показаны на рисунке 2.3 в окне программы [112].

Здесь для любой точки, лежащей на графике, по методу [112] можно определить абсциссу и ординату в растровых единицах, а затем рассчитать их в единицах, указанных на координатных осях. В правом верхнем углу окна имеются переключатели для выбора текущих значений  $\varepsilon$  (или  $\bar{\varepsilon}$ ),  $U$ ,  $T$ . На точку кривой, полученную пересечением с вертикальной осью и соответствующую выбранным значениям факторов, необходимо навести курсор и щелкнуть левой кнопкой "мыши". Программа вычисляет значение напряжения течения металла  $\sigma$ , а после нажатия кнопки "Поместить в таблицу" заносит его в соответствующую ячейку таблицы, показанную на рисунке 2.3.

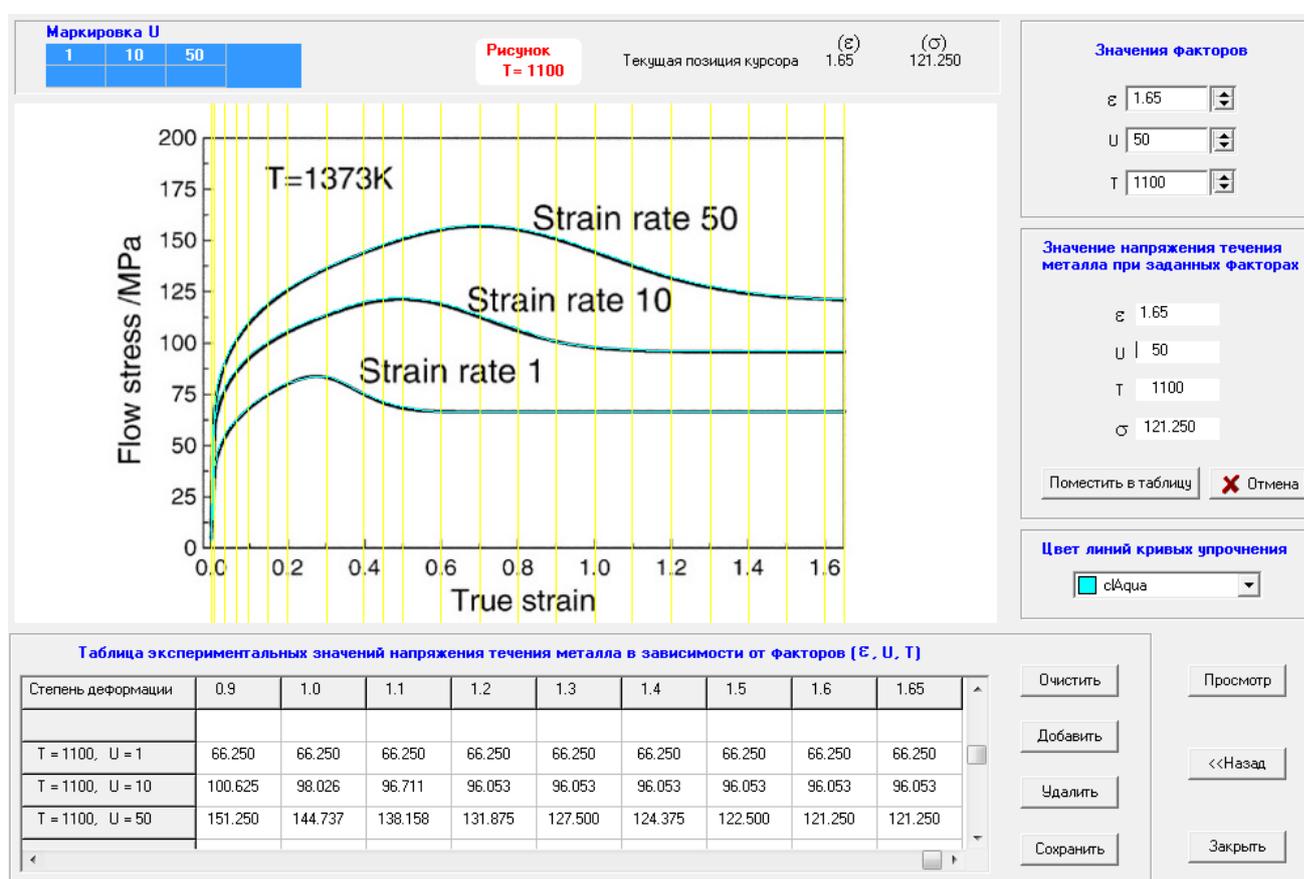


Рисунок 2.3. Окно снятия экспериментальной информации и контрольного построения сплайн-кривых течения стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn

Далее выполняется сплайн-интерполяция полученной информации и построение сплайн-кривых в окне рисунка 2.3, что обеспечивает наиболее точное описание экспериментальных кривых течения.

В работе [112] изложен метод автоматизированного определения напряжения течения металла  $\sigma$  в зависимости от фиксированных значений степени деформации  $\varepsilon$  (или  $\bar{\varepsilon}$ ), скорости деформации  $U$  и температуры  $T$ , основанный на использовании компьютерных баз цифровой информации для сталей и сплавов. На его основе разработана база для стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn (см. рисунок 2.4).

**Таблица экспериментальных значений напряжения течения металла  $\sigma$  (МПа) в зависимости от факторов:  $\varepsilon$ ,  $U$  (1/с),  $T$  (град.С)**

Степень деформации	0.02	0.025	0.05	0.075	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.6
T = 1099, U = 1	17.150	35.825	55.463	62.700	68.325	75.200	80.200	83.325	75.200	71.450	68.950	66.450
T = 1099, U = 10	40.800	56.779	78.325	87.075	93.621	100.825	106.450	113.950	120.200	121.450	122.075	119.575
T = 1099, U = 50	52.200	62.700	90.989	102.700	110.200	119.575	126.450	136.450	144.279	148.226	151.450	155.825
T = 1100, U = 1	16.950	35.625	55.263	62.500	68.125	75.000	80.000	83.125	75.000	71.250	68.750	66.250
T = 1100, U = 10	40.600	56.579	78.125	86.875	93.421	100.625	106.250	113.750	120.000	121.250	121.875	119.375
T = 1100, U = 50	52.000	62.500	90.789	102.500	110.000	119.375	126.250	136.250	144.079	148.026	151.250	155.625
T = 1101, U = 1	16.750	35.425	55.063	62.300	67.925	74.800	79.800	82.925	74.800	71.050	68.550	66.050
T = 1101, U = 10	40.400	56.379	77.925	86.675	93.221	100.425	106.050	113.550	119.800	121.050	121.675	119.175
T = 1101, U = 50	51.800	62.300	90.589	102.300	109.800	119.175	126.050	136.050	143.879	147.826	151.050	155.425

Степень деформации	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.65
T = 1099, U = 1	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450
T = 1099, U = 10	119.575	113.325	107.075	100.825	98.226	96.911	96.253	96.253	96.253	96.253	96.253	96.253
T = 1099, U = 50	155.825	157.700	155.825	151.450	144.937	138.358	132.075	127.700	124.575	122.700	121.450	121.450
T = 1100, U = 1	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250
T = 1100, U = 10	119.375	113.125	106.875	100.625	98.026	96.711	96.053	96.053	96.053	96.053	96.053	96.053
T = 1100, U = 50	155.625	157.500	155.625	151.250	144.737	138.158	131.875	127.500	124.375	122.500	121.250	121.250
T = 1101, U = 1	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050
T = 1101, U = 10	119.175	112.925	106.675	100.425	97.826	96.511	95.853	95.853	95.853	95.853	95.853	95.853
T = 1101, U = 50	155.425	157.300	155.425	151.050	144.537	137.958	131.675	127.300	124.175	122.300	121.050	121.050

Рисунок 2.4. Компьютерная база цифровой информации о кривых течения стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn в зависимости от степени истинной (логарифмической) деформации

На рисунке 2.5 показано окно компьютерной программы определения параметров зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$  на базе теории [108]. Указанная зависимость представлена в правой части окна. Основные формулы для расчета этих параметров, полученные в работе [108], показаны на рисунке 2.5. Здесь  $\sigma_y$ ,  $\sigma_p$ ,  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_x$  – термокинетические параметры:  $\sigma_p$  – пи-

ковое значение напряжения  $\sigma$  на кривой течения, соответствует пиковой деформации  $\varepsilon_p$ ;  $\sigma_y$  – установившееся напряжение, при котором наступает равновесие процессов упрочнения и динамической рекристаллизации при достижении деформации  $\varepsilon_x$ .

Влияние химического состава стали отражается величиной энергии активации деформации  $Q$  ( $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ), которая входит в комплексный температурно-скоростной параметр процесса деформации (параметр Zener-Hollomon ( $Z$ )),  $A$  – скоростная константа деформируемого материала [108].

Актуальной задачей является выполнение научно-обоснованного анализа точности зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , для которой в окне программы (рисунок 2.5) определены искомые термокинетические параметры применительно к стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn.

В работе [112] создана компьютерная программа, которая на первом этапе в автоматизированном режиме формирует план-матрицу эксперимента, обеспечивающую научно-обоснованный выбор наиболее рациональных точек в области изменения факторов  $\varepsilon, U, T$ , а на следующем – определяет соответствующие экспериментальные значения  $\sigma_{\text{эксн}}$ . Метод автоматизированного определения экспериментальных значений напряжения течения металла  $\sigma$  [112] в зависимости от фиксированных значений  $\varepsilon, U, T$  основан на использовании компьютерной базы цифровой информации.

При разработке план-матрицы в виде, показанном на рисунке 2.5, было применено центральное композиционное ортогональное планирование. Из компьютерной базы цифровой экспериментальной информации для стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn (рисунок 2.4) в таблицу, расположенную в верхней части окна (рисунок 2.5а), передаются пределы изменения факторов  $\varepsilon, U, T$ , которые, в случае необходимости, могут быть изменены. В этом же окне формируется таблица кодовых и натуральных значений факторов.

**Метод Солода В.С. и др.**

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь  
0.19C-0.20Si-0.40Mn

**Пределы изменения факторов**

$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.03	1.65	1	50	1099.9	1100.1

**Кодовые и натуральные значения факторов**

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154	
Натуральные значения факторов	$\varepsilon$	0.03	0.1736	0.8400	1.5064	1.65
	U (1/c)	1	5.342	25.500	45.658	50
	T (град.С)	1099.9	1099.918	1100.000	1100.082	1100.1

**Химический состав [%]**

C (0.05 - 1.1)	0.19
Si (0 - 1.65)	0.2
Mn (0.03 - 1.55)	0.4
Cr (0 - 0.3)	0.11
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.019
S (0 - 0.05)	0.011
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.16

**План-матрица эксперимента**

X1	X2	X3	$\varepsilon$	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{экс}}$ (МПа)	
1	-1	-1	-1	0.1736	5.342	1099.918	92.311
2	+1	-1	-1	1.5064	5.342	1099.918	82.993
3	-1	+1	-1	0.1736	45.658	1099.918	121.026
4	+1	+1	-1	1.5064	45.658	1099.918	119.762
5	-1	-1	+1	0.1736	5.342	1100.082	92.279
6	+1	-1	+1	1.5064	5.342	1100.082	82.960
7	-1	+1	+1	0.1736	45.658	1100.082	120.993
8	+1	+1	+1	1.5064	45.658	1100.082	119.729
9	-1.2154	0	0	0.03	25.500	1100.000	67.213
10	+1.2154	0	0	1.65	25.500	1100.000	108.681
11	0	-1.2154	0	0.8400	1	1100.000	66.250
12	0	+1.2154	0	0.8400	50	1100.000	154.158
13	0	0	-1.2154	0.8400	25.500	1099.9	126.748
14	0	0	+1.2154	0.8400	25.500	1100.1	126.708
15	0	0	0	0.8400	25.500	1100.000	126.728

**Результаты расчета**

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp\left( \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right)$$

$\sigma$ (МПа)	$\Delta$ (%)
93.788	1.600
80.642	2.833
119.602	1.176
113.966	4.840
93.764	1.609
80.612	2.831
119.570	1.176
113.923	4.849
72.705	8.172
102.394	5.784
68.120	2.823
130.827	15.134
117.484	7.309
117.430	7.322
$\Delta_{\text{ср}}$ (%)	4.985

Z / A	1	2	3
$\sigma_y$	17.032	17.032	145.571
$\sigma_p$	78.816	78.816	108.506
$\varepsilon_p$	104.470	104.470	138.375
$\varepsilon_x$	0.363	0.363	0.457
	0.265	0.265	0.337

Q 222686.932  
A 92282229.144

[? Справка](#)

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)  
Грасс 20.947    Fтабл 3.59    Грасс > Fтабл (адекватность обоснована)

**Выполнить**

[Дополнительно](#)    [Графики](#)    [«Назад](#)    [Далее»](#)

а

$$\text{где } \sigma_p = 72,06 \cdot (Z/A)^{0,131}, \quad \sigma_y = 51,66 \cdot (Z/A)^{0,149},$$

$$\varepsilon_x = 0,193 \cdot (Z/A)^{0,112}, \quad \varepsilon_p = 0,268 \cdot (Z/A)^{0,107}.$$

$$Z = U \cdot \exp[Q/(R \cdot T)],$$

где  $R = 8,318 \text{ Дж-моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  - газовая постоянная;  $T$  - абсолютная температура.

$$Q = 308700 + 37100 \cdot \ln(C\%) + 10900 \cdot \ln(C\%)^2 + 27000 \cdot (Si\%) +$$

$$+ 8100 \cdot (Mn\%) + 337100 \cdot (Cr\%) + 249900 \cdot (Ni\%) - 119000 \cdot (Cu\%) +$$

$$+ 181000 \cdot (V\%) - 288000 \cdot (P\%) - 855000 \cdot (S\%)$$

$$A = 0,146 \cdot \exp(9,1 \cdot 10^{-5} \cdot Q)$$

б

Рисунок 2.5. Окна программы, определения термокинетических параметров зависимости расчета напряжения течения металла  $\sigma$  на базе теории [108] и проверки ее адекватности: а – окно планирования эксперимента, б – формулы для расчета термокинетических параметров

План-матрица содержит 15 строк (опытов) для определения величин  $\sigma$  при указанных в них сочетаниях значений факторов  $\varepsilon$ ,  $U$ ,  $T$ . Последняя колонка план-матрицы содержит значения напряжения течения металла  $\sigma_{эксп}$ , которые определены с использованием компьютерной базы цифровой экспериментальной информации для стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn (рисунок 2.5), а также метода и программы, представленных в [112]. Указанные метод и программа были созданы для условий, когда задаются пределы изменения каждого из трех факторов. Поэтому в решаемой задаче задана не фиксированная температура, равная 1100 °С, а интервал в диапазоне  $1100 \pm 0,1$  °С.

Выполнена разработка функций компьютерной программы определения соответствующих расчетных значений  $\sigma_{расч}$  для каждого из 15-ти опытов на основе зависимостей, показанных на рисунках 2.5. С учетом значений  $\sigma_{эксп}$  в окне программы (рисунок 2.5) для стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn определили относительную погрешность для каждого из 15-ти опытов, которая находится в диапазоне 1,2-15,1 %, и среднюю относительную погрешность по всему планируемому эксперименту, которая составила 5 %.

Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера также реализована в компьютерной программе, окно которой показано на рисунке 2.5. Указанная проверка дала удовлетворительный результат.

Установлено, что зависимость для расчета напряжения течения металла, разработанная на базе теории, учитывающей химический состав углеродистой стали (0,19C–0,20Si–0,40Mn), температуру, скорость деформации, накопленную деформацию в рассматриваемой точке очага деформации, 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.

### 2.2.2. Анализ точности аппроксимации и экстраполяции экспериментальной информации по напряжению течения металла

Выполнена разработка функций компьютерной программы расчета и построения графических зависимостей напряжения течения металла ( $\sigma_{расч}$  и  $\sigma_{эксн}$ ) от степени логарифмической деформации  $\bar{\varepsilon}$  при фиксированных значениях скорости деформации  $U$  и температуры  $T$ . Результаты, представленные на рисунке 2.6, позволяют сделать вывод о том, что в диапазонах скорости деформации  $1-50 \text{ с}^{-1}$  и степени логарифмической деформации  $0,03-1,65$  качественный ход расчетных кривых соответствует экспериментальным. Средняя относительная погрешность по всему планируемому эксперименту (рисунок 2.5), не превысила 5 %.

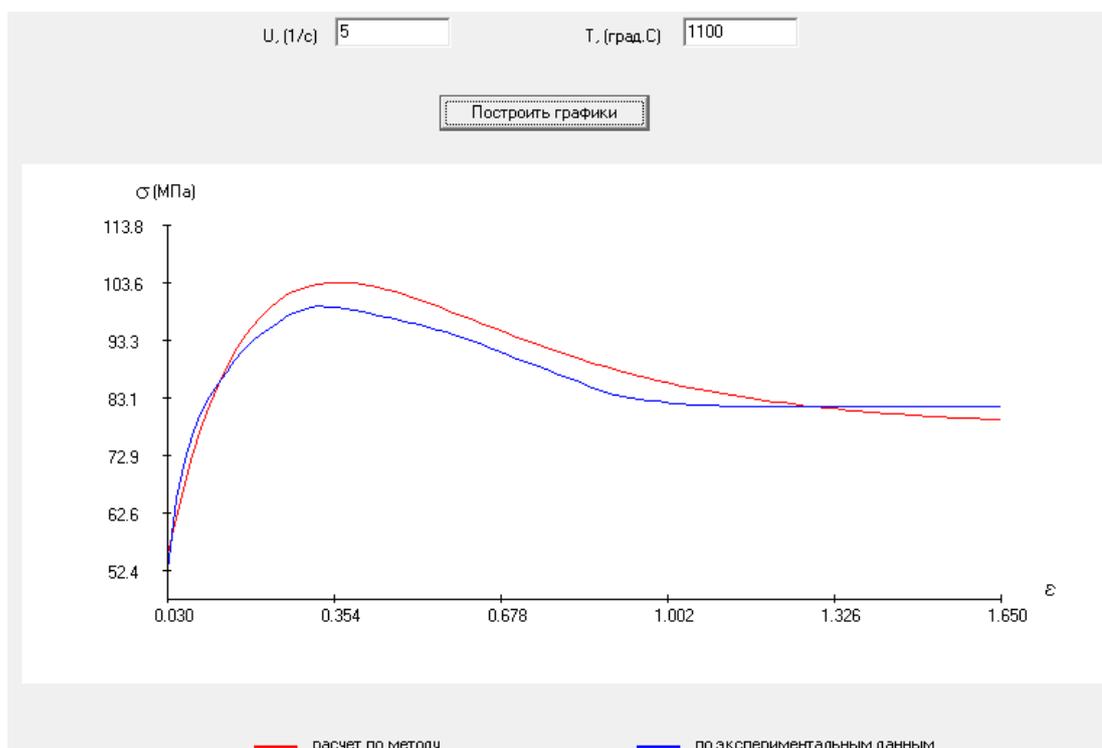


Рисунок 2.6. Расчетные  $\sigma_{расч}$  и экспериментальные  $\sigma_{эксн}$  графические зависимости напряжения течения стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn от степени логарифмической деформации  $\bar{\varepsilon}$  при фиксированных значениях  $U$  и  $T$

Кривые напряжения течения, представленные в работе [111] (рисунок 2.3) для стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn, дают возможность выполнить экстраполяцию экспериментальной информации по степени истинной (логарифмической) де-

формации до величины, большей чем 1,65. Это связано с тем, что по каждой из трех экспериментальных кривых при определенных значениях  $\bar{\varepsilon}$  уже имеет место разупрочнение металла и величина  $\sigma = const$ . В дальнейшем интервал по степени истинной деформации будет дополнительно рассмотрен и от 1,65 до 3,0.

Выполнена разработка функций компьютерной программы (на основе метода [112]) расчета и построения зависимостей напряжения течения металла ( $\sigma_{расч}$  и  $\sigma_{эксн}$ ) в указанном выше диапазоне по  $\bar{\varepsilon}$ .

Компьютерная база цифровой информации о кривых течения стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn, представленная на рисунке 2.4, была дополнена еще одной колонкой при  $\bar{\varepsilon} = 3,0$ , значения в которой повторяли соответствующие значения при  $\bar{\varepsilon} = 1,65$ . Предусмотрена сплайн-интерполяция расширенной информации.

На рисунке 2.7 представлены результаты аппроксимации и экстраполяции информации по напряжению течения металла. Показаны расчетные  $\sigma_{расч}$  и экспериментальные  $\sigma_{эксн}$  графические зависимости для стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn от степени логарифмической деформации  $\bar{\varepsilon}$  на интервале 0,03–3,0. С учетом значений  $\sigma_{эксн}$  в окне программы (рисунок 2.7) для стали 0,19C–0,20Si–0,40Mn определили относительную погрешность для каждого из 15-ти опытов, которая находится в диапазоне 0,1–8,4 %, и среднюю относительную погрешность по всему планируемому эксперименту, которая составила 5,1 %. Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера также реализована в компьютерной программе, окно которой показано на рисунке 2.7. Указанная проверка дала удовлетворительный результат.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о том, что зависимость для расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , разработанная на базе теории [108], может использоваться для конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец, который требует как аппроксимации, так и экстраполяции экспериментальной информации напряжения течения металла  $\sigma$ . На рисунке 2.7 представлены расчетные  $\sigma_{расч}$  и экспериментальные  $\sigma_{эксн}$  зависимости для стали

0,19C–0,20Si–0,40Mn от степени логарифмической деформации  $\bar{\epsilon}$  на интервале 0,03-3,0.

**Метод Солода В.С. и др.**

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь  
0.19C-0.20Si-0.40Mn

**Пределы изменения факторов**

$\epsilon_{min}$	$\epsilon_{max}$	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.03	3	1	50	1099,9	1100,1

**Кодовые и натуральные значения факторов**

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154
Натуральные значения факторов					
$\epsilon$	0.03	0.2932	1.5150	2.7368	3
U (1/c)	1	5.342	25.500	45.658	50
T (град.С)	1099,9	1099,097	1099,550	1100,003	1100,1

**Химический состав [%]**

C (0.05 - 1.1)	0.19
Si (0 - 1.65)	0.2
Mn (0.03 - 1.55)	0.4
Cr (0 - 0.3)	0.11
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.019
S (0 - 0.05)	0.011
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.16

**План-матрица эксперимента**

	X1	X2	X3	$\epsilon$	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп.}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.2932	5.342	1099.097	100.380
2	+1	-1	-1	2.7368	5.342	1099.097	83.182
3	-1	+1	-1	0.2932	45.658	1099.097	133.607
4	+1	+1	-1	2.7368	45.658	1099.097	118.902
5	-1	-1	+1	0.2932	5.342	1100.003	100.199
6	+1	-1	+1	2.7368	5.342	1100.003	83.001
7	-1	+1	+1	0.2932	45.658	1100.003	133.426
8	+1	+1	+1	2.7368	45.658	1100.003	118.721
9	-1.2154	0	0	0.03	25.500	1099.550	67.303
10	+1.2154	0	0	3	25.500	1099.550	108.771
11	0	-1.2154	0	1.5150	1	1099.550	66.340
12	0	+1.2154	0	1.5150	50	1099.550	122.361
13	0	0	-1.2154	1.5150	25.500	1099,9	109,249
14	0	0	+1.2154	1.5150	25.500	1100,1	109,029
15	0	0	0	1.5150	25.500	1099,550	109,139

**Результаты расчета**

$\sigma$ (МПа)	$\Delta$ (%)
103.555	3.163
78.986	5.044
133.677	0.053
108.965	8.357
103.393	3.188
78.834	5.020
133.475	0.037
108.754	8.395
72.785	8.146
99.640	8.395
62.043	6.477
115.657	5.479
103.800	4.988
103.537	5.037

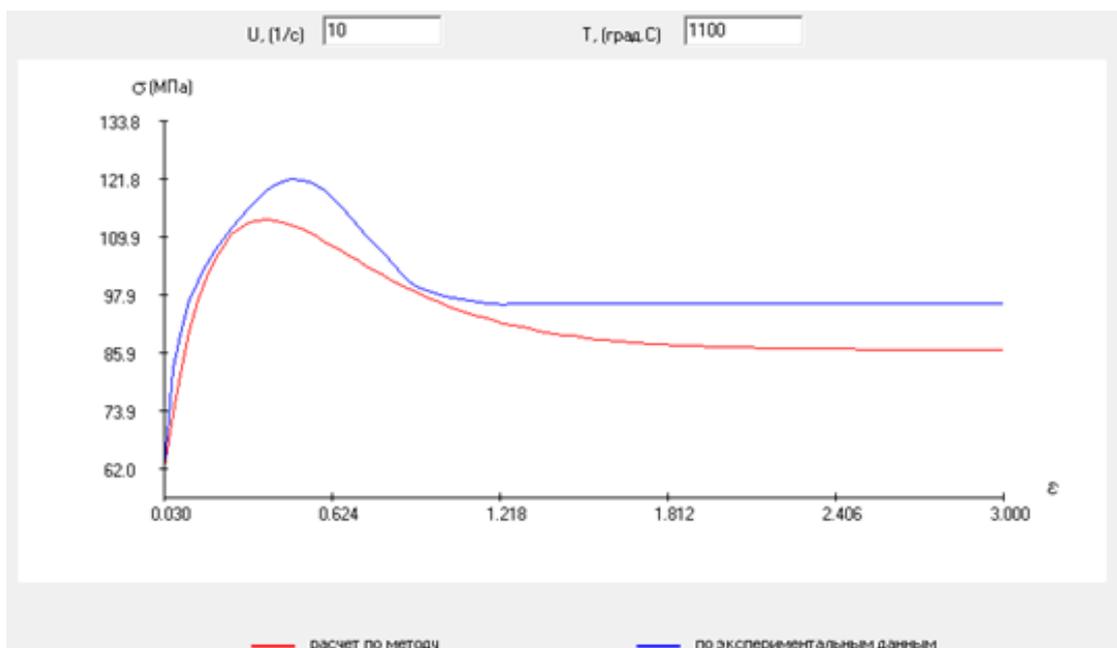
$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left( \frac{\epsilon - \epsilon_p}{\epsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp\left( \frac{\epsilon_p - \epsilon}{\epsilon_x} \right)$

Z/A	1	2	3
$\sigma_y$	78.953	78.953	108.695
$\sigma_p$	104.629	104.629	138.586
$\epsilon_p$	0.363	0.363	0.457
$\epsilon_x$	0.265	0.265	0.338

Q 222686.932  
A 92282229.144

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)  
Грассч 40.793    Гтабл 3.59    Грассч > Гтабл (адекватность обоснована)

а



б

Рисунок 2.7. Результаты аппроксимации и экстраполяции информации по напряжению течения металла по методу Солода В.С. и др.

### **2.3. Методика конечно-элементного моделирования процессов осадки, штамповки и разгонки кольцевой заготовки**

Моделирование процессов осадки, штамповки и разгонки заготовки выполнено на основе подходов и методик, изложенных в работах [110, 113].

Моделирование выполнено для сектора заготовки  $180^\circ$ . Заготовка моделировалась как пластический объект. Температура нагрева заготовки в печи равна  $1260^\circ\text{C}$ . Время транспортировки заготовки от печи к осадочному прессу силой 20 МН и между прессами силой 20 МН и 40/20 МН принято одинаковым и равным 20 с.

Инструмент деформации во всех случаях моделировали как недеформируемый объект, имеющий постоянную температуру, равную  $350^\circ\text{C}$ .

Средняя величина скорости рабочего хода траверс прессов силой 20 МН и 40/20 МН (а также пуансона пресса 40/20 МН) равна 30 мм/с.

### **2.4. Методика проведения эксперимента, оценка точности измерения параметров прокатки кольца**

Для проверки адекватности теоретических разработок и изучения закономерностей процесса прокатки колец с наружным гребнем необходимы результаты экспериментальных исследований энергосиловых и геометрических параметров. Отдельные результаты имеются в работах [53, 99]. В работе [87] представлены экспериментальные данные, полученные в промышленных условиях при прокатке прямоугольных в сечении колец, а в работе [88] – бандажей. Настоящая работа направлена на получение аналогичной экспериментальной информации для условий прокатки кольца с наружным гребнем – фланца. Прежде всего – на получение экспериментальных данных по силе и геометрическим параметрам кольца с наружным гребнем в зависимости от времени при прокатке на промышленном радиально-осевом кольцепрокатном стане.

Для реализации экспериментальных исследований необходимо выполнить проектирование калибровки главного валка кольцепрокатного стана и контура фасонной кольцевой заготовки, получаемой штамповкой, которые в значительной мере определяют режим обжатий. Требуется также установить температурно-скоростной режим прокатки, а также точность измерительной аппаратуры, установленной на кольцепрокатном стане стационарно.

Поставлена задача построения на базе экспериментальных данных графических зависимостей скорости роста внутреннего диаметра кольца, а также толщины кольца и силы прокатки в радиальном очаге деформации от времени.

Экспериментальные исследования выполнены на промышленном радиально-осевом кольцепрокатном стане (см. рисунки 2.1, 2.8), техническая характеристика которого представлена в таблице 2.1.

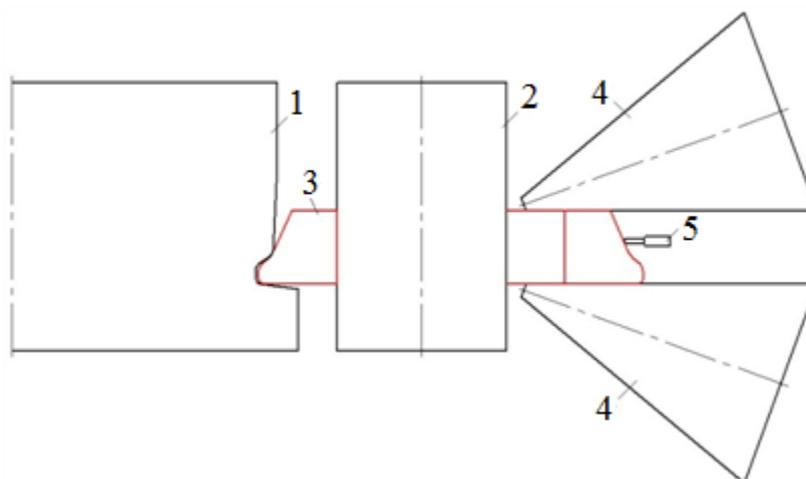


Рисунок 2.8. Схема радиально-осевого кольцепрокатного стана при прокатке кольца с наружным гребнем: 1 – главный приводной валок; 2 – валок-оправка; 3 – прокатываемое кольцо с наружным гребнем; 4 – наклонные (конические) валки; 5 – устройство для измерения наружного диаметра кольца

Выполнено проектирование калибровки по металлу для кольцепрокатного стана (рисунок 2.9) и контура радиального сечения фасонной кольцевой заготовки с гребнем (рисунок 2.10), получаемой штамповкой, которые в значительной мере определили режим обжатий при прокатке фланца из стали 60. Температур-

ный интервал прокатки 1010-965 °С. Значения диаметров вертикальных валков и скорости прокатки в эксперименте, а также максимально допустимые параметры, характеризующие работу стана, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Техническая характеристика кольцепрокатного стана

Параметры	Значения параметров
Диаметр главного приводного валка (max), мм	1100
Диаметр валка-оправки, мм	250
Скорость прокатки, м/с	1,5
Мощность привода главного валка, кВт	630
Сила прокатки в вертикальных валках, МН	1,5
Сила прокатки в наклонных валках, МН	1,25
Скорость движения валка-оправки, мм/с	10

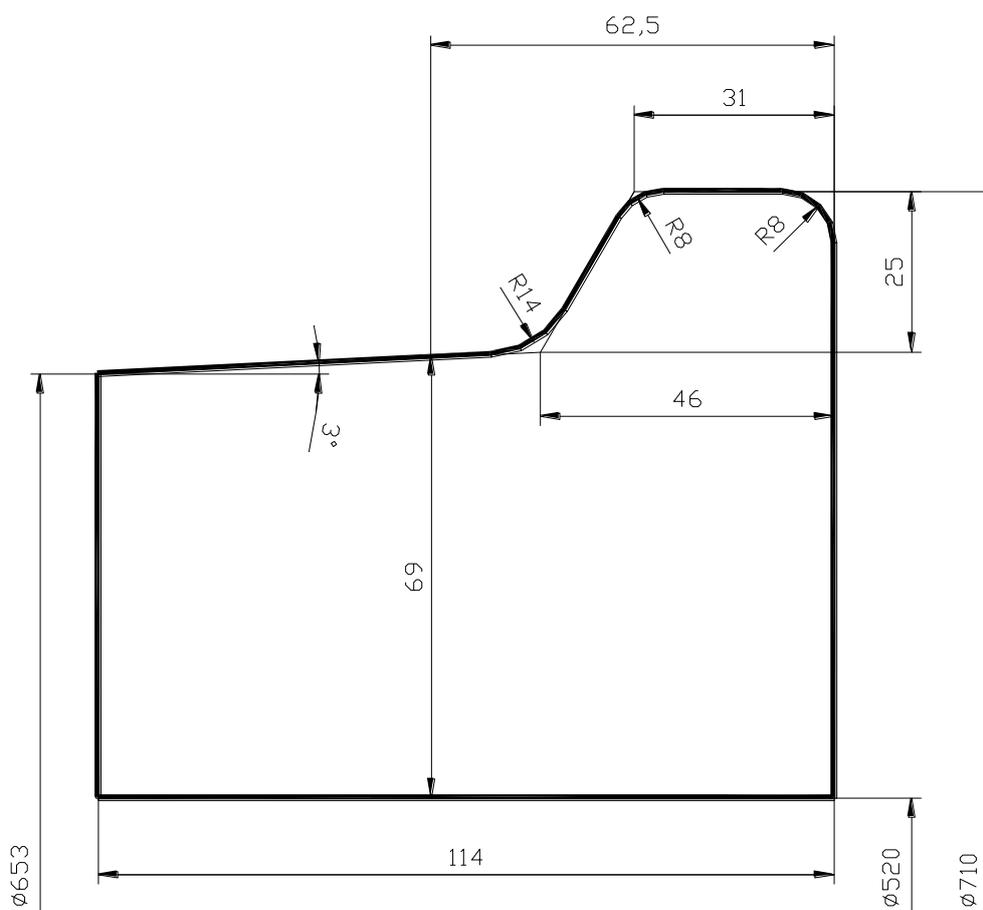


Рисунок 2.9. Калибровка по металлу для кольцепрокатного стана

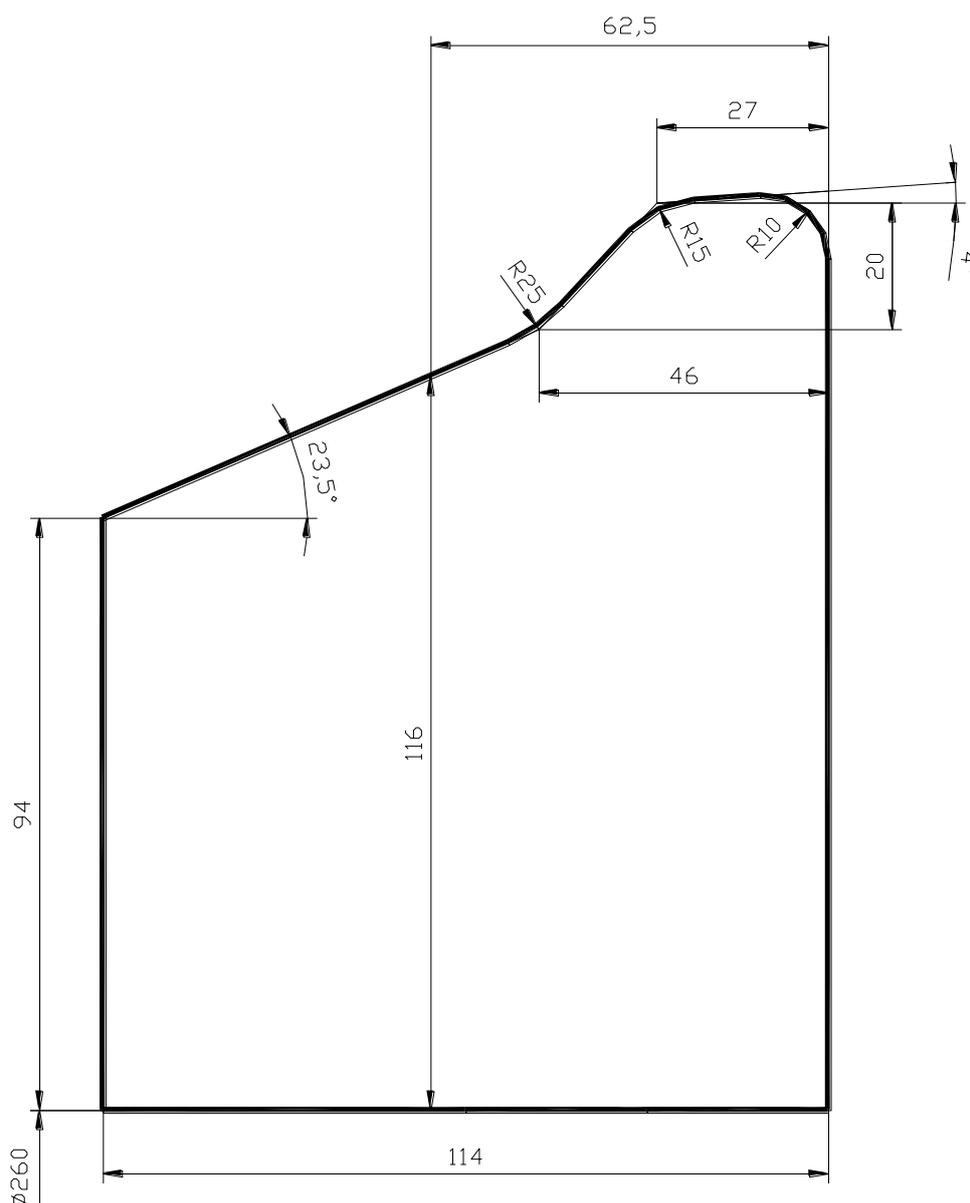


Рисунок 2.10. Контур радиального сечения фасонной кольцевой заготовки с гребнем, получаемой штамповкой

Значения толщины кольца и его внутреннего диаметра в процессе прокатки получили на базе показаний импульсных фотоэлектрических датчиков ПДФ-3, установленных стационарно на кольцепрокатном стане. Точность измерений толщины кольца – 0,01%, внутреннего диаметра – 0,1%.

Значения сил прокатки в радиальном очаге деформации получили на базе показаний измерительных преобразователей давления в электрические сигналы ”Сапфир-22”, установленных стационарно на кольцепрокатном стане

(погрешность измерений  $\pm 0,1\%$ ) [88]. Температуру металла в начальный и конечный моменты прокатки измеряли оптическим пирометром.

Результаты выполненных экспериментальных исследований по силовым и геометрическим параметрам прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане представлены в пункте 4.2.1.

### Выводы

1. 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.

2. Выполненные исследования позволяют сделать вывод о том, что выбранная зависимость для расчета напряжения течения углеродистых марок сталей, в которой учтены процессы динамического преобразования структуры металла в процессе его горячей пластической деформации, может использоваться как для аппроксимации, так и экстраполяции экспериментальной информации напряжения течения металла.

3. Представлена методика проведения эксперимента, выполнена оценка точности измерения параметров процесса прокатки кольца. Значения толщины кольца и его внутреннего диаметра в процессе прокатки получали на базе показаний импульсных фотоэлектрических датчиков ПДФ-3, установленных стацио-

нарно на кольцепрокатном стане. Точность измерений толщины кольца – 0,01%, внутреннего диаметра – 0,1%. Значения сил прокатки в радиальном очаге деформации получили на базе показаний измерительных преобразователей давления в электрические сигналы, установленных стационарно на кольцепрокатном стане (погрешность измерений  $\pm 0,1\%$ ).

Материалы настоящего раздела опубликованы в работах [114-117].

### РАЗДЕЛ 3

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ КОЛЕЦ С НАРУЖНЫМ ГРЕБНЕМ И КАЛИБРОВОК ДЛЯ ИХ ШТАМПОВКИ И ПРОКАТКИ

Проектирование профилей колец с наружным гребнем и калибровок для их штамповки и прокатки занимает значительную часть в объеме работ калибровщика при создании технологии их производства. Поэтому актуально проектирование выполнять на базе специализированных компьютерных программ [68-70, 82]

### **3.1. Автоматизированное проектирование чистовых механически обработанных или технологических фланцев**

В основе автоматизированного проектирования контуров сечений чистовых механически обработанных и чистовых технологических профилей фланцев лежит использование библиотек их составных элементов и специализированных компьютерных программ [68, 70].

Контур сечения фланца состоит из таких четырех основных элементов, которые могут отличаться своей конфигурацией: нижняя часть фланца (элемент 1); правая боковая часть фланца (элемент 2); верхняя часть фланца (элемент 3); левая боковая сторона фланца (элемент 4). Для каждого из четырех элементов имеется набор схем (рисунки 3.1 – 3.4). Структура разбиения контура сечения фланца на элементы показана на рисунке 3.5.

Пользователь программы выбирает из библиотеки необходимую комбинацию элементов и задаёт требуемые размеры. Программа объединяет эти элементы в единый контур, выполняет все расчеты и проектирует контур профиля кольцевого изделия. Любую информацию по фланцу можно менять в произвольном порядке, всякий раз контролируя результаты корректировок в окне просмотра.

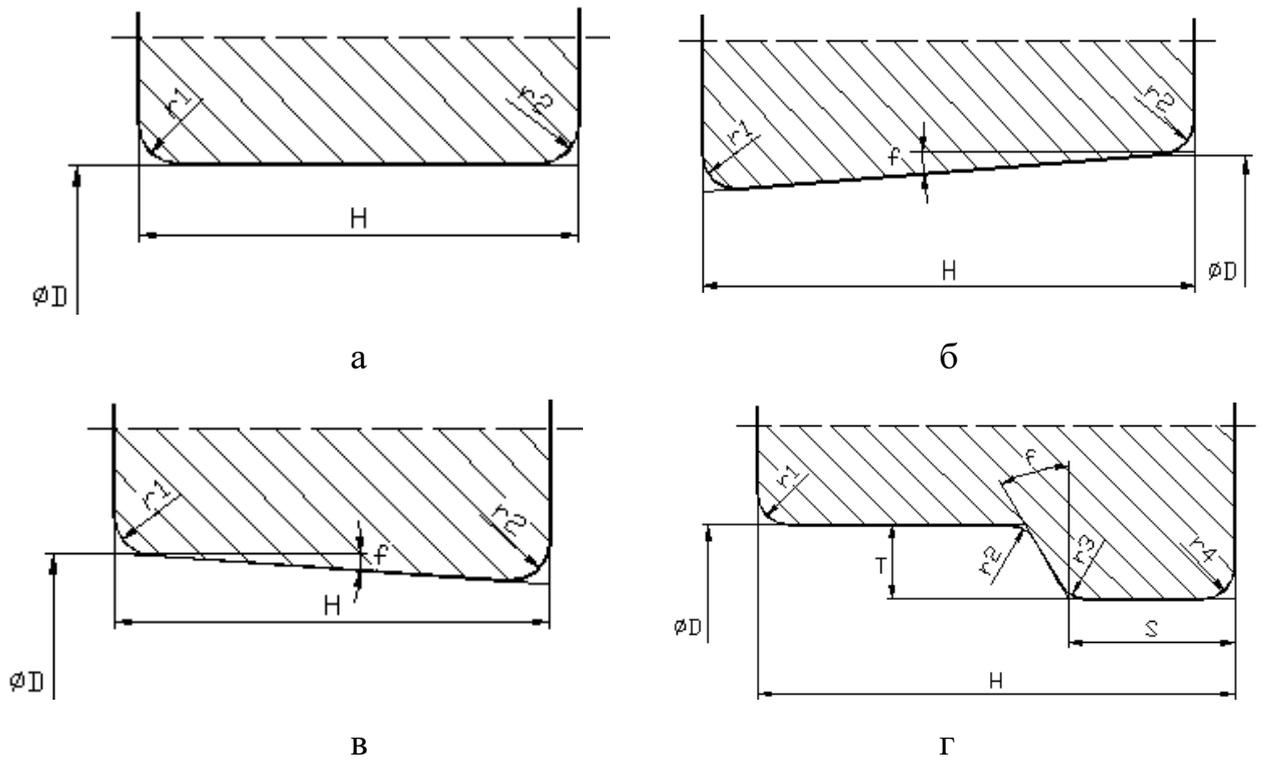


Рисунок 3.1. Библиотека схем для нижней части фланца (элемент 1)

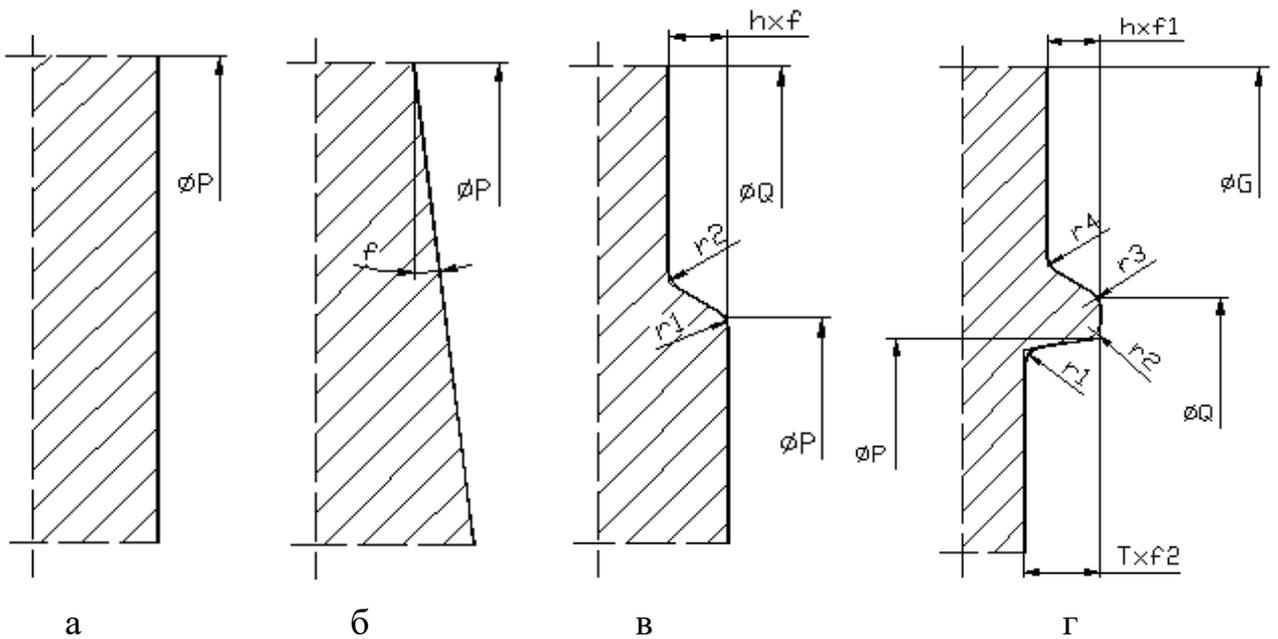


Рисунок 3.2. Библиотека схем для правой боковой части фланца (элемент 2)

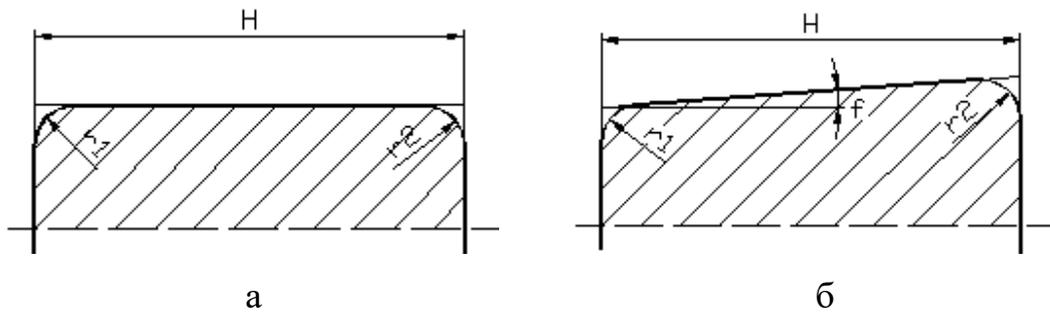


Рисунок 3.3. Библиотека схем для верхней части фланца (элемент 3)

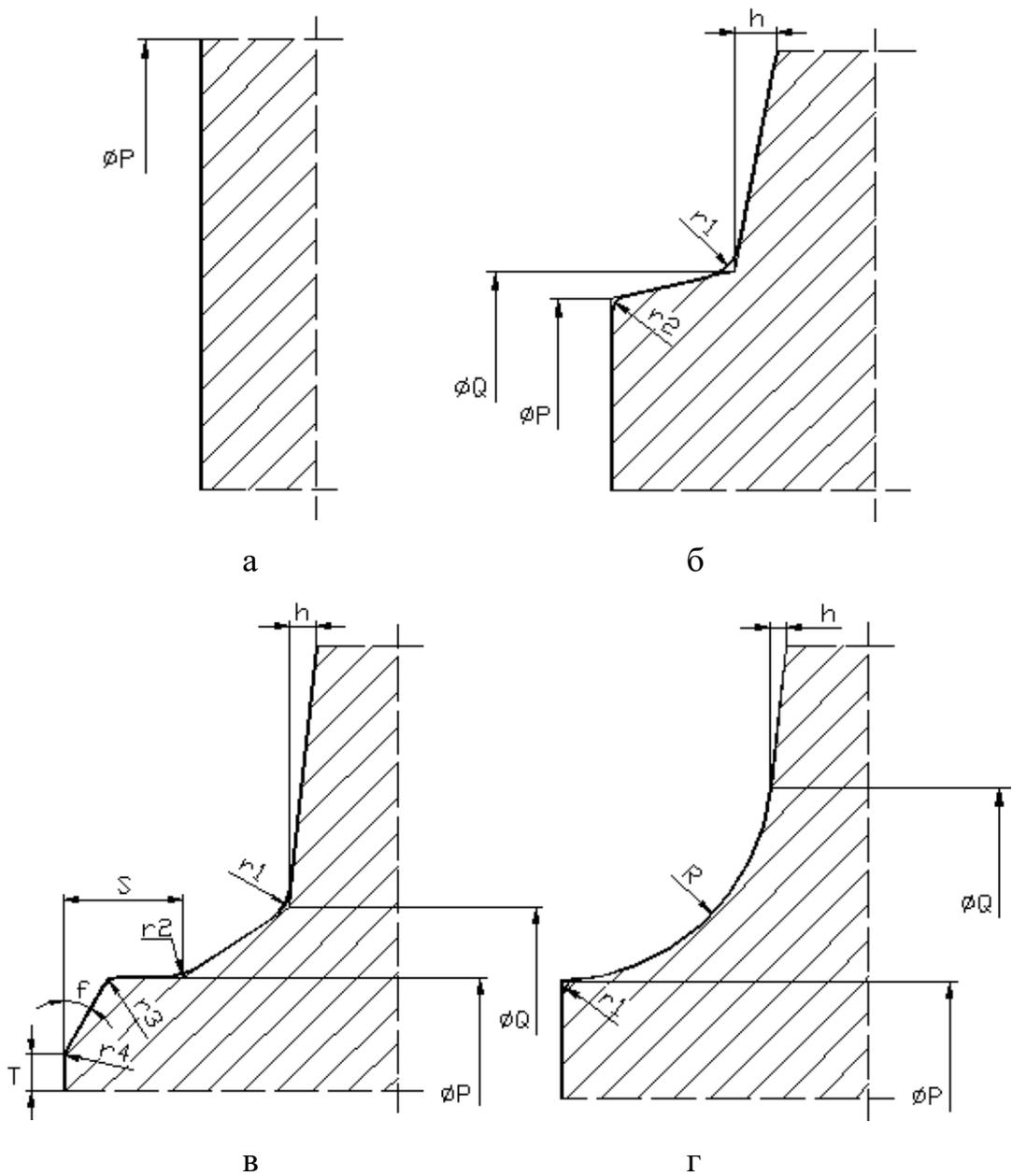


Рисунок 3.4. Библиотека схем для левой боковой части фланца (элемент 4)

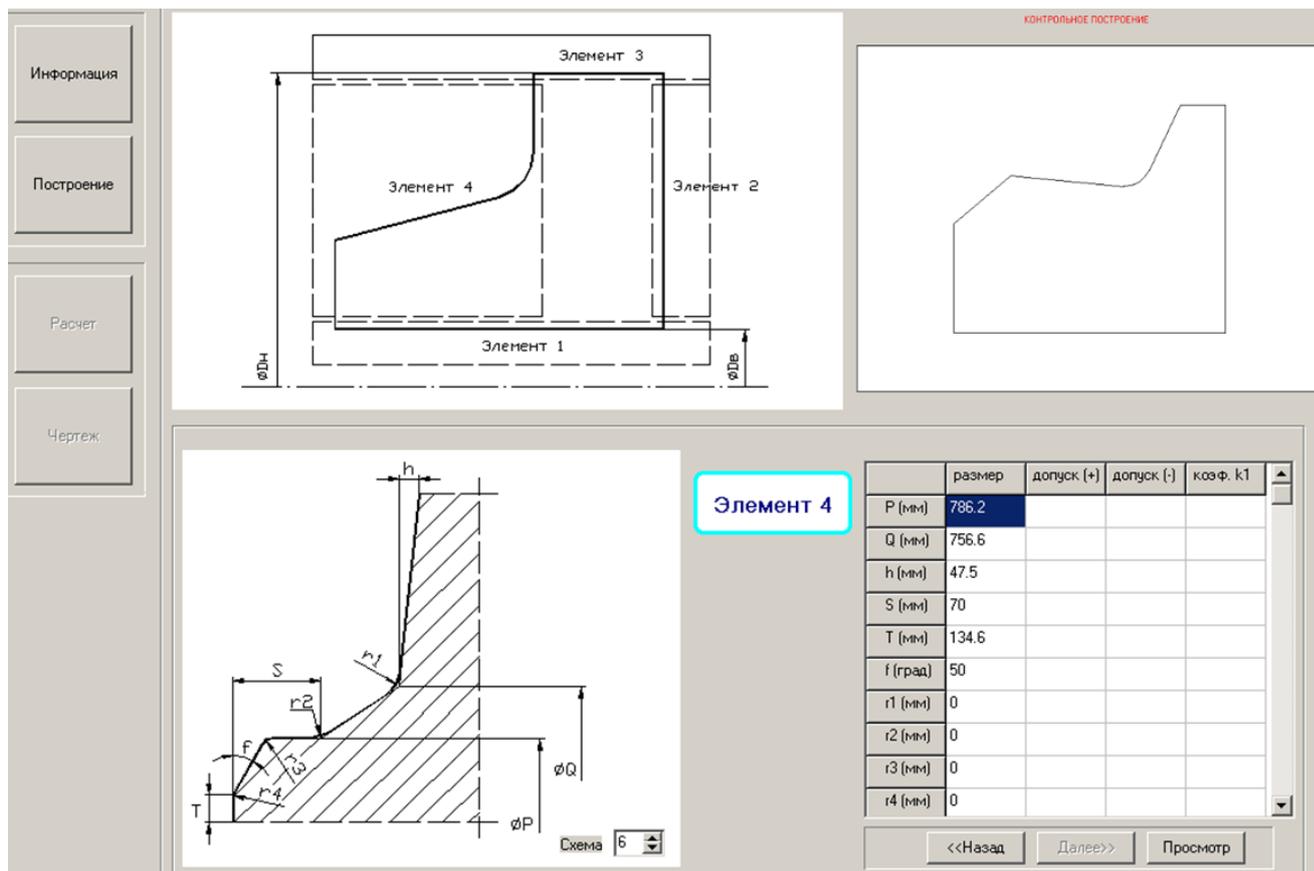


Рисунок 3.5. Задание исходной информации (на примере элемента №4) для проектирования чистового технологического фланца (контура сечения вала колесопрокатного стана) и его контрольного построения

Построение контура сечения чистового технологического фланца выполнено в окне программы, показанном на рисунке 3.5. В левой верхней панели расположена схема, отображающая структуру разбивки сечения фланца на элементы, а также буквенные обозначения отдельных его размеров. Эта информация является базовой, так как характеризует фланец в целом, а не отдельные его элементы, и была задана в первую очередь.

В левой нижней части панели расположено окно для выбора схемы элемента или ее варианта, которые показаны на рисунках 3.1 – 3.4. Справа от окна находится таблица, в которую задана исходная информация в соответствии с выбранной схемой для элемента №4. Так как элементов у фланца четыре, а окно одно, то для перехода от текущего элемента к последующему и наоборот, предусмотрены

две кнопки «далее» и «назад». В центре панели в информационном окне отображается, какой элемент является текущим.

После контрольного построения чистового фланца автоматически был выполнен расчет его основных параметров (площади контура сечения фланца, координат центра тяжести его сечения, а также объема и массы фланца).

### **3.2. Автоматизированное проектирование профиля чернового фланца – контура сечения валка колесопрокатного стана**

При проектировании чернового профиля в холодном состоянии значение коэффициента температурного расширения металла задано равным единице. Также задана плотность металла, равная  $7850 \text{ кг/м}^3$ .

Автоматизированное проектирование профиля чернового фланца (контура сечения валка колесопрокатного стана) выполнено в следующей последовательности.

По различным элементам профиля были заданы номинальные припуски, включающие припуски на устранение дефектного слоя и отрицательные части полей допусков на прокатку. Припуски назначены с целью обеспечения требуемых размеров. Указанные значения приняты по аналогии с данными работы [70]. Порядок задания номинальных припусков по контуру фланца определен схемой, показанной в окне программы (рисунок 3.6). Здесь показаны точки, в которых нормируются номинальные припуски. Их значения, а также ряд дополнительных размеров были указаны в вертикально расположенной таблице.

После задания всей требуемой информации выполнено проектирование профиля чернового фланца по номинальным размерам. Цифровая информация об указанном контуре в виде координат точек сопряжений, координат точек центров дуг и значений радиусов этих дуг рассчитывается на базе моделей [66] и аналогичной информации по контуру чистового фланца.

Следующее окно программы (рисунок 3.7) становится доступным после нажатия кнопки «перейти к таблице размеров» в предыдущем окне. В нем под

схемой фланца предусмотрена таблица, в которую автоматически заносятся его номинальные размеры. Они рассчитываются программой на основе соответствующих размеров чистового фланца и заданных номинальных припусков. Допуски на прокатку были заданы в таблицу (рисунок 3.7) для тех размеров, у которых они предусмотрены.

Информация для расчета черного фланца по номинальным размерам	
h1 (мм)	10
h2 (мм)	5.3
h3 (мм)	10
h4 (мм)	10
h5 (мм)	10
h6 (мм)	17
h7 (мм)	9
f1 (град)	0
f2 (град)	25
f3 (град)	-5
r1 (мм)	0
r2 (мм)	0
r3 (мм)	15
r4 (мм)	15
r5 (мм)	30
r6 (мм)	-10
r7 (мм)	0
r8 (мм)	0
S (мм)	81.8
f4 (град)	41

Номер схемы: 2

<<Перейти к таблице размеров

Рисунок 3.6. Задание номинальных припусков и других размеров для проектирования черного фланца (контура сечения валка колесопрокатного стана)

В последней строке таблицы для любого из размеров, имеющих поле допуска, можно задать индивидуальный коэффициент  $k_1$ , который изменяется в диапазоне от 0 до 1, и характеризует требуемую величину поля допусков (например, при  $k_1 = 0$  выполняется проектирование по наименьшим размерам черного

профиля, при  $k1 = 0,5$  – с учетом среднего поля допусков, при  $k1 = 1$  – по наибольшим размерам черного профиля).

Любой размер черного фланца, вычисленный автоматически, может быть изменен калибровщиком для реализации его конструктивных решений (рисунок 3.7). В этом случае, чтобы исключить автоматический перерасчет размеров, необходимо установить флажок в окне «произвольные размеры». Снятие флажка позволяет вернуться к прежнему режиму расчета.

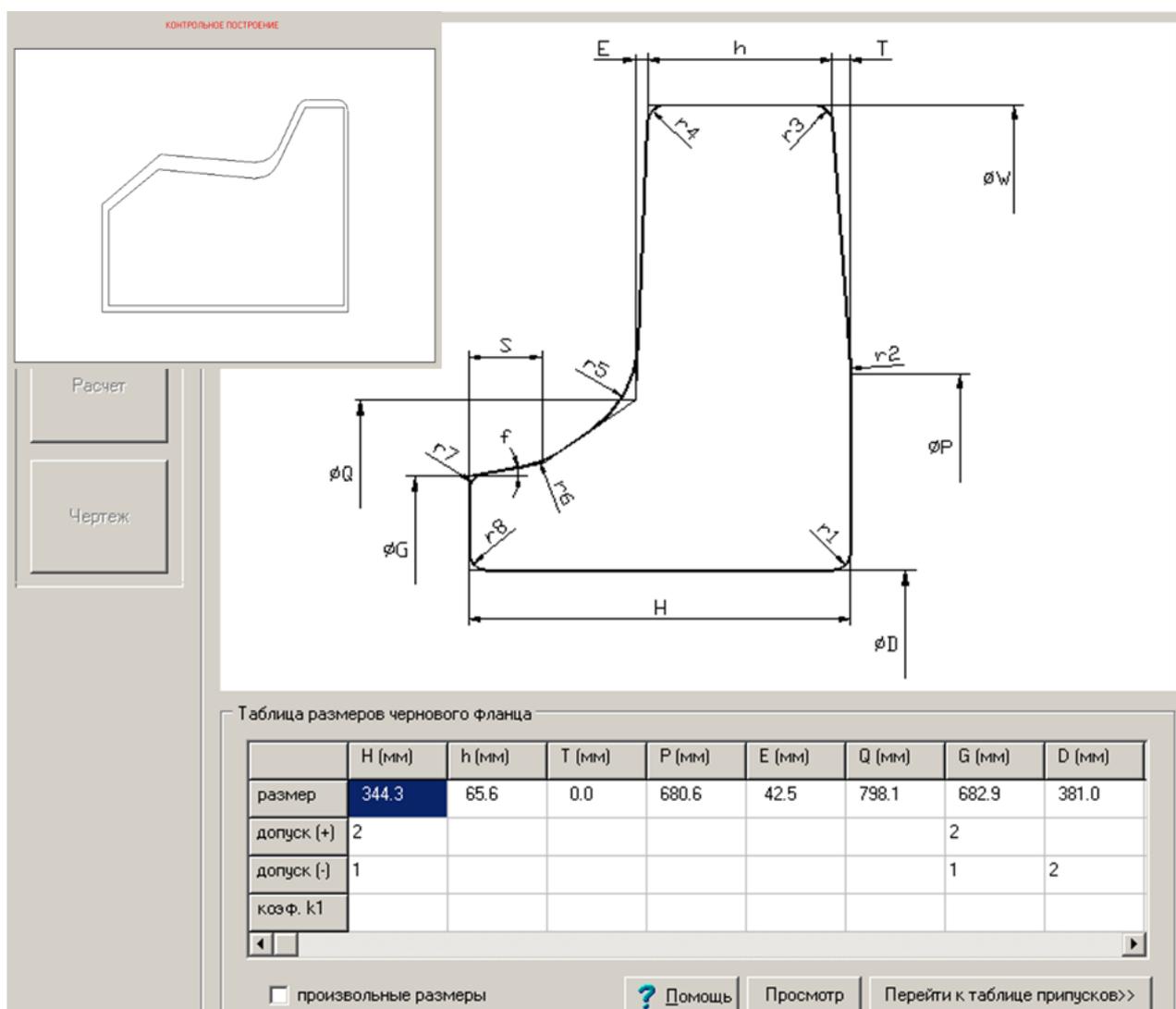


Таблица размеров черного фланца

	H (мм)	h (мм)	T (мм)	P (мм)	E (мм)	Q (мм)	G (мм)	D (мм)
размер	344.3	65.6	0.0	680.6	42.5	798.1	682.9	381.0
допуск (+)	2						2	
допуск (-)	1						1	2
коэф. k1								

произвольные размеры

? Помощь    Просмотр    Перейти к таблице припусков>>

Рисунок 3.7. Задание полей допусков на прокатку черного фланца (контура сечения валка колесопрокатного стана)

После задания всей требуемой информации выполняют контрольное построение профиля черного фланца по номинальным размерам или с учетом

требуемой части полей допусков, а затем после его просмотра получают и анализируют результаты расчетов (рисунок 3.8) и чертеж, который выполнен с автоматической простановкой размеров.

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА**

Координаты точек сопряжения контура сечения, мм

N	x	y	r-связь
1	349.972	192.850	0.000
2	349.972	345.404	0.000
3	349.972	482.451	15.000
4	334.972	497.451	0.000
5	292.940	497.451	15.000
6	279.348	488.796	0.000
7	249.144	424.089	-30.000
8	219.306	406.896	0.000
9	87.263	418.624	10.000
10	79.818	416.210	0.000

Центры дуг контура сечения, мм

N	x-ц	y-ц	R
1	334.972	482.451	15.000
2	292.940	482.451	15.000
3	221.960	436.778	30.000
4	86.378	408.663	10.000

Основные расчетные параметры

Площадь, мм <sup>2</sup>	81681.010
X- центра тяжести	190.874
Y- центра тяжести	313.282
R- центра тяжести	313.282
Объем, мм <sup>3</sup>	160781470.836

Доля металла на угар (нагрев 1)

Доля металла на угар (нагрев 2)

Масса выдавки, кг

Масса угара 1, кг

Масса угара 2, кг

Масса заготовки для резки, кг

Плотность, кг/м<sup>3</sup>

Масса, кг

Рисунок 3.8. Результаты расчета основных параметров черного фланца и контура его сечения

### 3.3. Автоматизированное проектирование калибровок для штамповки и прокатки валка колесопрокатного стана

Проектирование калибровок для штамповки и прокатки фланцев является важным этапом разработки технологии их производства.

Математическая модель, на основе которой выполняется сопряжение прямых с дугами окружностей или дуг окружностей между собой и, соответственно, проектируется фасонный профиль фланца, создана в работе [66].

Автоматизированное проектирование калибровки по металлу для кольце-прокатного стана [118] выполнено на основе контура черного фланца (см. рисунок 3.7). При этом задан и автоматически учтен коэффициент температурного расширения металла, равный 1,015.

Цифровая информация о черновом фланце передается в окно программы проектирования калибровки для заготовочного пресса (см рисунок 3.9). Контур черного фланца с проставленными размерами (калибровка по металлу для кольце-прокатного стана) на рисунке 3.10 показан синим цветом.

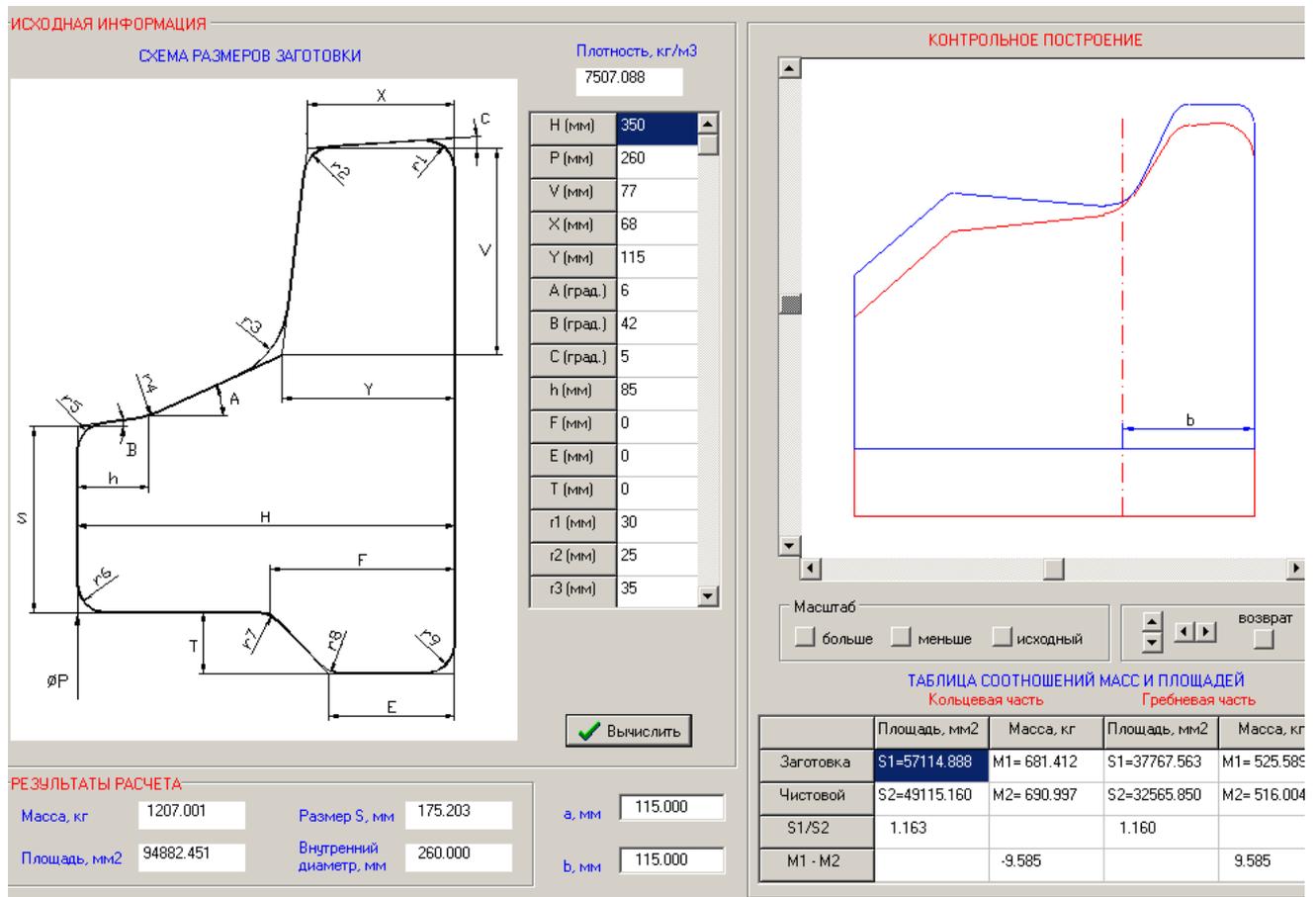


Рисунок 3.9. Проектирование в автоматизированном режиме калибровки для штамповки заготовки с наружным гребнем на заготовочном прессе (заготовки для прокатки валка колесо-прокатного стана)

В левом поле окна (рисунок 3.9) показана схема контура проектируемой заготовки с гребнем, которую получают на заготовочном прессе. Ввод исходной

информации выполнен в вертикально расположенной таблице. Левое нижнее поле предназначено для вывода ряда расчетных параметров: массы, площади радиального сечения заготовки, ее внутреннего диаметра и высоты ее кольцевой части. В правом нижнем поле расположена таблица для вывода в автоматическом режиме ряда расчетных параметров (площадей, масс и вытяжек), характеризующих кольцевую и гребневую части заготовки и прокатанного из нее фланца.

На рисунке 3.9 представлено контрольное построение захода гребня кольцевой заготовки в гребневую часть калибра. Изменяя в вертикально расположенной таблице размеры гребня заготовки, обеспечили выполнение условия выкатки гребня и исключают образование заката с его левой стороны в соответствии с патентом на изобретение [60].

В окне контрольного построения контура проектируемой кольцевой заготовки с гребнем (показан красным цветом) и контура, прокатанного из нее на стане фланца (показан синим цветом), предусмотрены размеры  $a$  и  $b$  (толщины гребневых частей соответствующих контуров). На рисунке 3.9 показан только один размер  $b$  в связи с тем, что эти размеры в рассматриваемом случае равны.

Указанные выше контуры совмещаются, при этом по умолчанию скелетные точки контуров, разделяющие их кольцевые и гребневые части, автоматически располагаются на вертикально расположенной прямой, показанной красной пунктирной линией. В случае необходимости величину  $b$  калибровщик тоже может изменить. При этом нормирование вытяжек и масс будет осуществляться относительно нейтральной линии, смещенной от скелетной точки, разделяющей гребневую и кольцевую части готового фланца.

Изменяя в окне программы величины  $H$ ,  $a$ ,  $b$  задается требуемое суммарное осевое обжатие раската наклонными валками кольцепрокатного стана и его распределение на левую и правую стороны профиля. Пунктирная линия, показанная на рисунке 3.9, по существу является нейтральной линией, относительно которой металл в калибре стана течёт в его кольцевую и гребневую части. Определение требуемых параметров, в том числе нормирующих заход гребня, выполняется на

базе известного технического решения [58], полученного для условий прокатки кольцевых профилей с наружным гребнем.

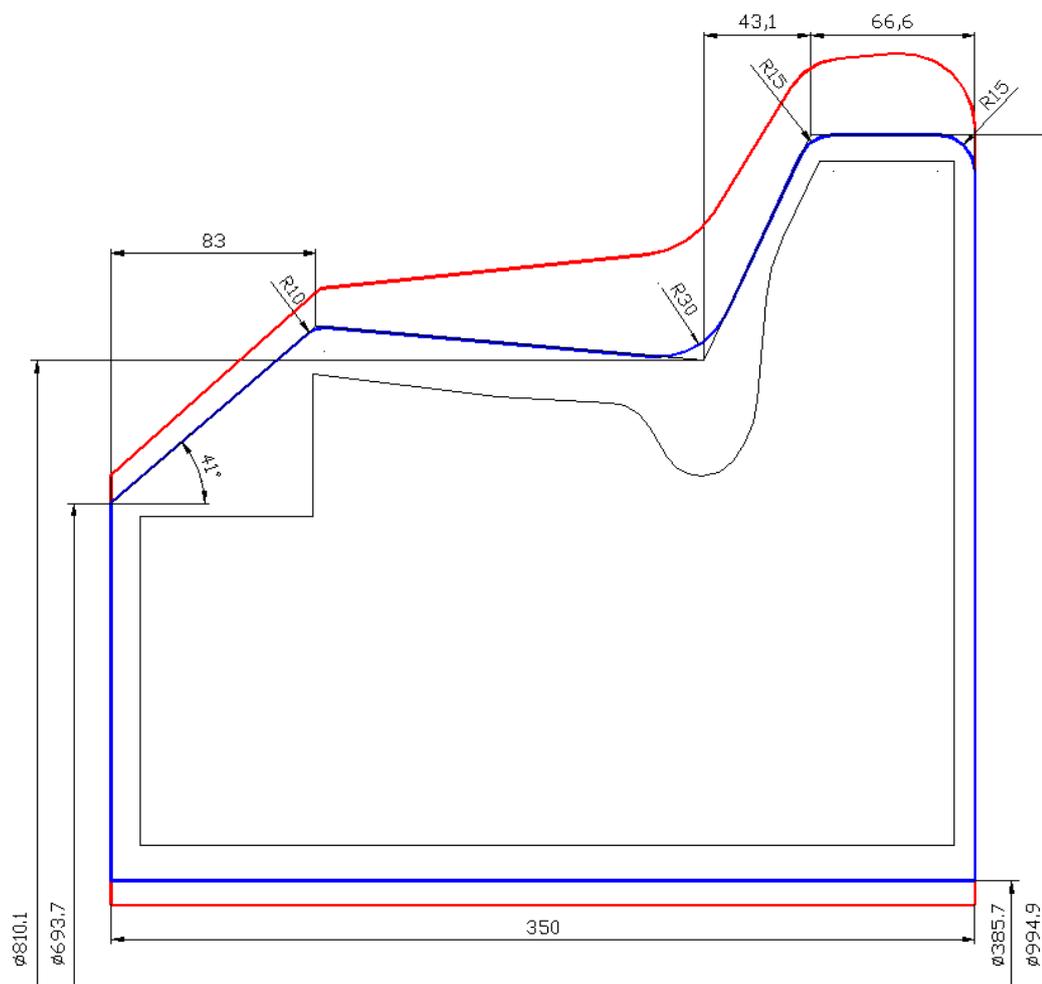


Рисунок 3.10. Совмещение контуров: чистового механически обработанного главного валка колесопрокатного стана (показан черным цветом); прокатанного на стане черного фланца (калибровка по металлу для кольцепрокатного стана – показан синим цветом); кольцевой заготовки с гребнем (калибровка по металлу для заготовочного прессы – показан красным цветом)

Разработка калибровки является итерационным процессом. Указанные параметры ( $H$ ,  $a$ ,  $b$ ) и другие калибровщик может скорректировать по результатам конечно-элементного моделирования рассматриваемого процесса или по результатам опытной прокатки. Важным критерием является соотношение вытяжек в гребневой и кольцевой частях профиля, которые рассчитаны в таблице, расположенной в правом нижнем поле окна программы. Для предотвращения утяжки

гребня по его высоте вытяжки по кольцевой и гребневой частям фланца должны быть практически равными, что обеспечено (вытяжки равны 1, 16).

Для реализации расчётов был задан требуемый внутренний диаметр кольцевой заготовки (равный 260 мм). Он определяется диаметром прошивного пуансона и должен быть несколько больше диаметра валка-оправки кольцепрокатного стана. Соответственно, при этом автоматически рассчитывается площадь радиального сечения кольцевой заготовки и вытяжка при прокатке на стане, которые учитываются при разработке калибровки. Контур спроектированной в окне программы кольцевой заготовки с гребнем (калибровка по металлу для заготовочно-го пресса) на рисунке 3.10 показан красным цветом.

### **Выводы**

1. На базе специализированной компьютерной программы 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.

2. На базе специализированной компьютерной программы выполнено автоматизированное проектирование калибровок для штамповки заготовок с наружным гребнем и прокатки фланцев на кольцепрокатном стане. При этом 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.

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

Материалы настоящего раздела опубликованы в работах [68, 118-120].

## РАЗДЕЛ 4

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ КОЛЕЦ, ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

#### 4.1. Прямоугольные в сечении кольца типа «втулка»

##### 4.1.1. Совершенствование метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане

Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец выполнена в подразделе 2.1. В пункте 2.2.1 обоснована целесообразность использования при этом зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , разработанной на базе теории [108].

Здесь поставлена задача определения параметров этой зависимости, в которой учитывается накопленная деформация, а также процессы динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке. Выбор этой стали связан с необходимостью конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец, для которого в работе [87] имеются результаты эксперимента, выполненного в промышленных условиях. Экспериментальные кривые течения стали 45 [109] показаны на рисунке 4.1 в окне снятия экспериментальной информации и контрольного построения соответствующих сплайн-кривых.

В работе [112] изложен метод автоматизированного определения напряжения течения металла в зависимости от фиксированных значений степени деформации  $\varepsilon$  (или степени логарифмической деформации  $\bar{\varepsilon}$ ), скорости деформации  $U$  и температуры  $T$ , основанный на использовании компьютерных баз цифровой информации (рисунок 4.2).

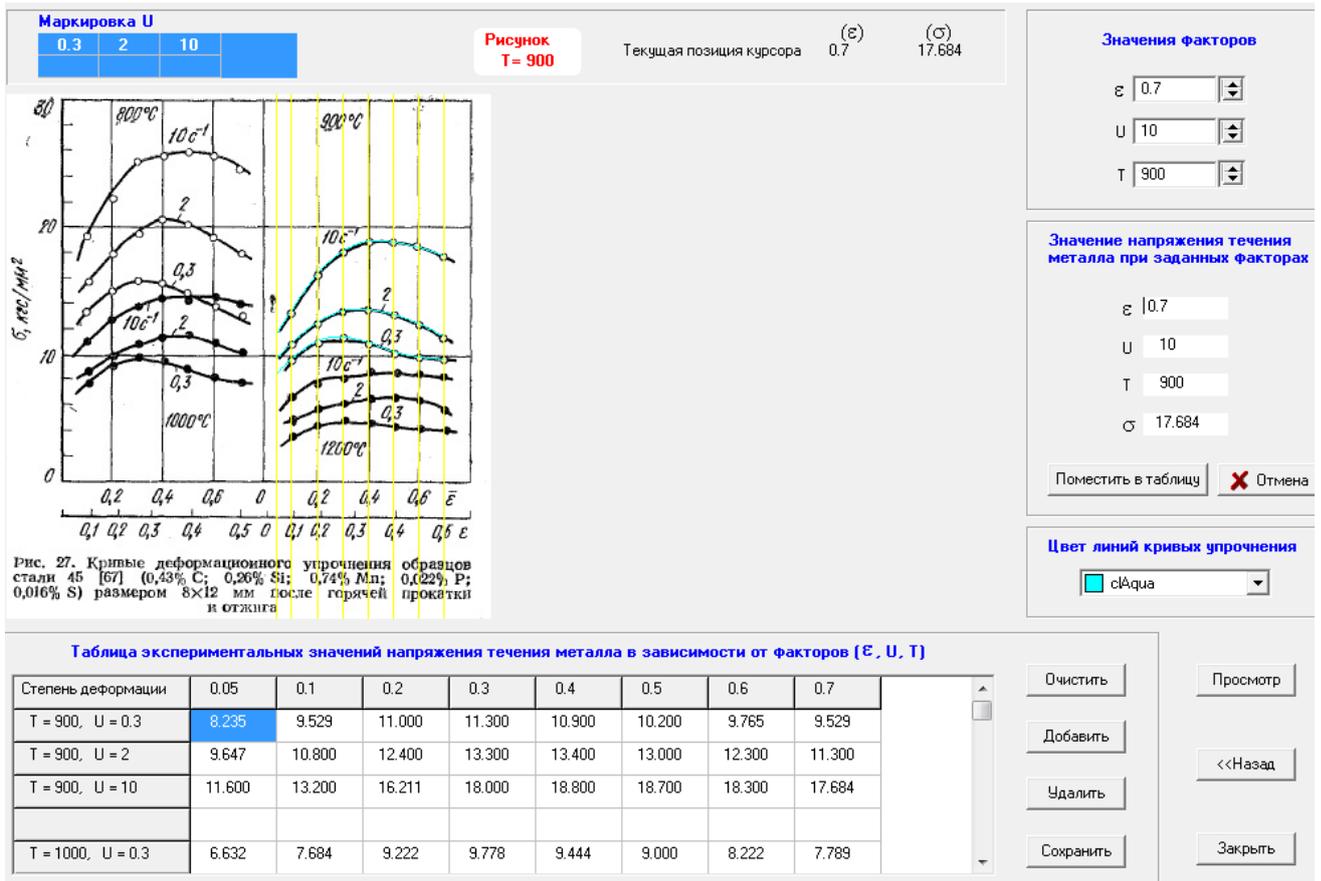


Рисунок 4.1. Окно снятия экспериментальной информации и контрольного построения сплайн-кривых течения стали 45

Наименование марки: Сталь 45

Имя файла: КАТАЛОГ\1\Сталь 45,стр. 104,рис.27

Таблица экспериментальных значений напряжения течения металла  $\sigma$  (МПа) в зависимости от факторов:  $\epsilon$ , U (1/с), T (град.С)

Степень деформации	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	1.2
T = 900, U = 0.3	80.703	93.384	107.800	110.740	106.820	99.960	95.697	93.384	93.384
T = 900, U = 2	94.541	105.840	121.520	130.340	131.320	127.400	120.540	110.740	110.740
T = 900, U = 10	113.680	129.360	158.868	176.400	184.240	183.260	179.340	173.303	173.303
T = 1000, U = 0.3	64.994	75.303	90.376	95.824	92.551	88.200	80.576	76.332	76.332
T = 1000, U = 2	77.371	84.937	98.980	106.820	111.720	113.680	107.800	99.960	99.960
T = 1000, U = 10	98.000	108.780	125.852	135.132	142.355	143.394	144.423	138.229	138.229
T = 1200, U = 0.3	26.460	34.300	43.120	46.060	45.080	43.120	41.160	39.200	39.200
T = 1200, U = 2	43.120	47.040	55.860	59.780	63.700	64.680	61.740	55.860	55.860
T = 1200, U = 10	51.940	64.680	76.440	78.400	83.016	81.859	81.859	78.400	78.400

Рисунок 4.2. Компьютерная база цифровой информации о кривых течения стали 45

На рисунке 4.3 показано окно компьютерной программы определения параметров зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$  на базе теории [108]. Указанная зависимость представлена в правой части окна.

Актуальной задачей является выполнение на основе соответствующего планируемого эксперимента научно-обоснованного анализа точности полученной зависимости для расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , для которой в окне программы (рисунок 4.3) определены искомые термокинетические параметры применительно к стали 45.

**Метод Солода В.С. и др.**

Имя файла: КАТАЛОГ  
\\1\Сталь 45, стр. 104, рис. 27

**Пределы изменения факторов**

$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.05	1.2	0.3	10	900	1200

**Кодовые и натуральные значения факторов**

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154	
Натуральные значения факторов	$\varepsilon$	0.05	0.1519	0.6250	1.0981	1.2
	U (1/c)	0.3	1.160	5.150	9.140	10
	T (град.С)	900	926.584	1050.000	1173.416	1200

**Химический состав [%]**

C (0.05 - 1.1)	0.43
Si (0 - 1.65)	0.26
Mn (0.03 - 1.55)	0.74
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.022
S (0 - 0.05)	0.016
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	

**План-матрица эксперимента**

	X1	X2	X3	$\varepsilon$	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эсп.}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.1519	1.160	926.584	103.691
2	+1	-1	-1	1.0981	1.160	926.584	99.297
3	-1	+1	-1	0.1519	9.140	926.584	135.042
4	+1	+1	-1	1.0981	9.140	926.584	157.715
5	-1	-1	+1	0.1519	1.160	1173.416	52.232
6	+1	-1	+1	1.0981	1.160	1173.416	54.271
7	-1	+1	+1	0.1519	9.140	1173.416	75.916
8	+1	+1	+1	1.0981	9.140	1173.416	83.663
9	-1.2154	0	0	0.05	5.150	1050.000	77.136
10	+1.2154	0	0	1.2	5.150	1050.000	104.795
11	0	-1.2154	0	0.6250	0.3	1050.000	69.808
12	0	+1.2154	0	0.6250	10	1050.000	127.295
13	0	0	-1.2154	0.6250	5.150	900	142.702
14	0	0	+1.2154	0.6250	5.150	1200	70.276
15	0	0	0	0.6250	5.150	1050.000	110.127

**Результаты расчета**

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp \left( \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right)$$

$\sigma$ (МПа)	$\Delta$ (%)
107.917	4.076
110.210	10.990
138.455	2.527
154.444	2.074
67.111	28.487
53.869	0.740
83.850	10.450
75.671	9.552
70.565	8.519
93.558	10.723
68.479	1.904
120.757	5.136
167.212	17.176
74.712	6.312

$\Delta_{\text{ср}} (\%)$  7.973

Z / A	1	2	3
$\sigma_y$	81.099	81.099	639.003
$\sigma_p$	99.448	99.448	135.262
$\varepsilon_p$	128.167	128.167	167.964
$\varepsilon_x$	0.429	0.429	0.535
	0.316	0.316	0.398

Q 251988.163  
A 1327779935.374

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)  
Fрасч 44.345 Fтабл 3.59 Fрасч > Fтабл (адекватность обоснована)

Рисунок 4.3. Определение термокинетических параметров зависимости расчета напряжения течения  $\sigma$  для стали 45 на базе теории [108] и проверки ее адекватности

В известной компьютерной программе [112] выполнена разработка функций определения соответствующих расчетных значений  $\sigma_{\text{расч}}$  для каждого из 15-

ти опытов на основе полученной зависимости. С учетом значений  $\sigma_{эксп}$  в окне программы (рисунок 4.3) для стали 45 определили среднюю относительную погрешность по всему планируемому эксперименту, которая составила 8 %. Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера была также реализована. Указанная проверка дала удовлетворительный результат.

Также выполнена разработка функций компьютерной программы расчета и построения зависимостей напряжения течения металла ( $\sigma_{расч}, \sigma_{эксп}$ ) от степени логарифмической деформации  $\bar{\varepsilon}$  при фиксированных значениях скорости деформации  $U$  ( $0,3 \text{ с}^{-1}$ ) и температуры  $T$  (1000, 1200 °С). При указанных значениях факторов  $\bar{\varepsilon}$  и  $U$  исходные экспериментальные кривые (см. рисунок 4.4) позволяют выполнить их экстраполяцию в диапазоне  $\varepsilon$  от 0,7 до большей величины. Это связано с тем, что по каждой из двух указанных кривых при определенных значениях  $\bar{\varepsilon}$  зафиксировано разупрочнение металла и величина  $\sigma = const$ . В дальнейшем интервал по степени истинной деформации рассмотрен от 0,7 до 1,2. Это нашло отражение в компьютерной базе цифровой информации о кривых течения стали 45, представленной на рисунке 4.3. В свою очередь это позволило выполнить проверку расчетных кривых в более широком диапазоне изменения  $\bar{\varepsilon}$ .

Результаты, представленные на рисунках 4.3, 4.4, позволяют сделать вывод о том, что расчетные кривые, адекватно описывают экспериментальные кривые течения для стали 45.

В процессе конечно-элементного моделирования предусмотрен режим компенсации изменения объема заготовки. В качестве целевого был выбран объем исходной заготовки, задаваемый в программу вместе с файлом для описания геометрии.

Исходная информация, используемая в процессе конечно-элементного моделирования, представлена в таблице 4.1. В процессе проведения эксперимента в промышленных условиях [87] кольцо при прокатке формировалось между неподвижным валком-оправкой и главным приводным валком, которые установлены вертикально (см. рисунок 2.1).

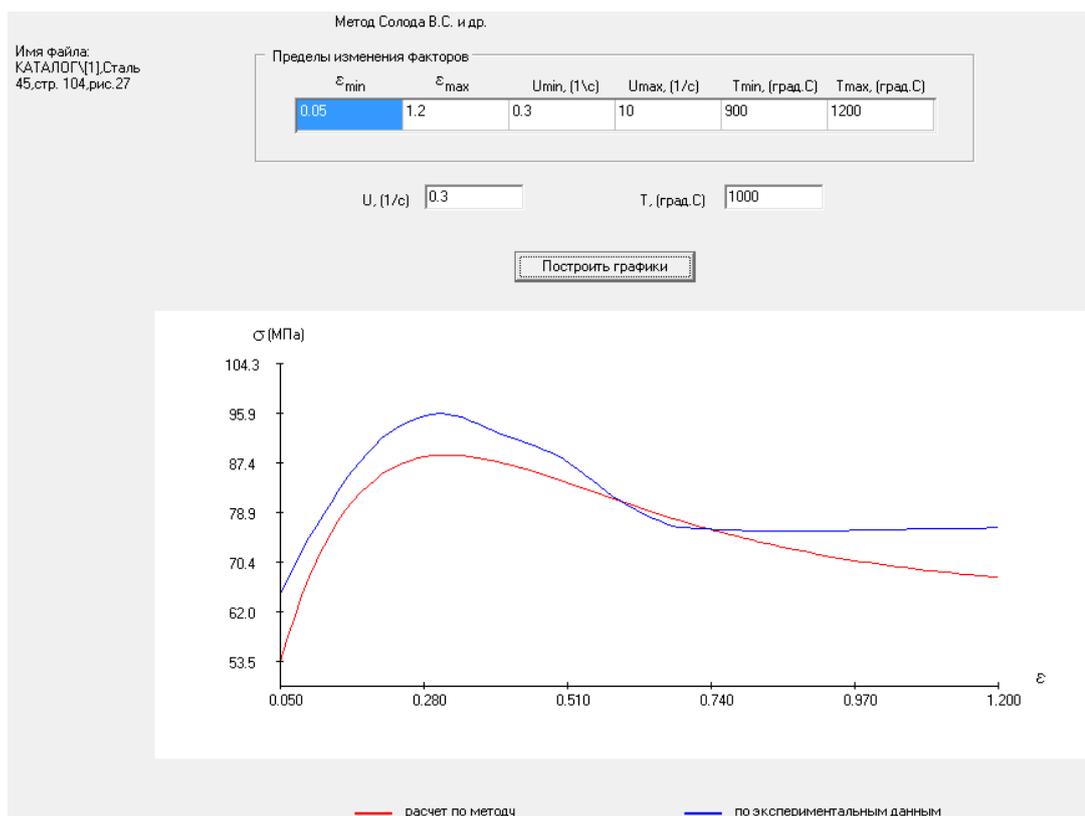


Рисунок 4.4. Расчетная  $\sigma_{расч}$  и экспериментальная  $\sigma_{эксн}$  кривые при фиксированных значениях  $U$  и  $T$  ( $U = 0,3 \text{ с}^{-1}$ ,  $T = 1000 \text{ °C}$ )

Обжатие стенки кольца и соответствующее увеличение его диаметра осуществлялось перемещением вала-оправки в сторону главного вала с помощью гидравлического привода. При прокатке кольцо центрировалось роликами, которые удерживали его на оси стана и обеспечивали минимальную овальность кольца. При проведении экспериментальных измерений использован комплекс тензометрической аппаратуры, установленной на стане стационарно [87].

В процессе проведения экспериментальной прокатки в течение 5 с был выполнен выход на скорость роста наружного диаметра кольца  $V_d$ , которая системой управления станом с определенной точностью выдерживалась постоянной на основном этапе прокатки кольца (до 0,9 наружного диаметра кольца). Средняя скорость роста наружного диаметра кольца на указанном этапе по экспериментальным данным составила  $V_d = 13,4 \text{ мм/с}$ .

Таблица 4.1. Основные параметры прокатки колец из стали 45 в процессе выполнения эксперимента [87]

Параметры	Единицы измерения	Обозначения	Значения параметров
Высота кольцевой заготовки	мм	$B_0$	200,0
Толщина кольцевой заготовки	мм	$H_0$	105,1
Наружный диаметр заготовки	мм	$D_0$	372,7
Внутренний диаметр заготовки	мм	$D_B$	162,5
Высота кольца	мм	$b_K$	200,0
Толщина кольца	мм	$h_K$	18,6
Наружный диаметр кольца	мм	$d$	1530,7
Внутренний диаметр кольца	мм	$d_B$	1493,5
Скорость прокатки	м/с	$V_B$	1,2
Диаметр главного валка	мм	$D$	850
Диаметр валка-оправки	мм	$d_0$	160
Время прокатки	с	$t$	105
Температурный интервал прокатки	°С	$\theta_H - \theta_K$	1040-890

При конечно-элементном моделировании, показанном на рисунке 4.5, также выдерживали указанную скорость роста диаметра кольца, которая по существу и определила параметры, которые были измерены в процессе проведения экспериментальной прокатки.

Скорость роста наружного диаметра кольца зависит от величины обжатия  $\Delta h$ . Потребуем, чтобы выполнялось условие:

$$|V_d - Sr| < \delta, \quad (4.1)$$

где  $Sr$  – требуемое значение скорости роста наружного диаметра кольца;  $\delta$  – заданная величина, определяющая точность выхода на требуемую скорость роста наружного диаметра кольца.

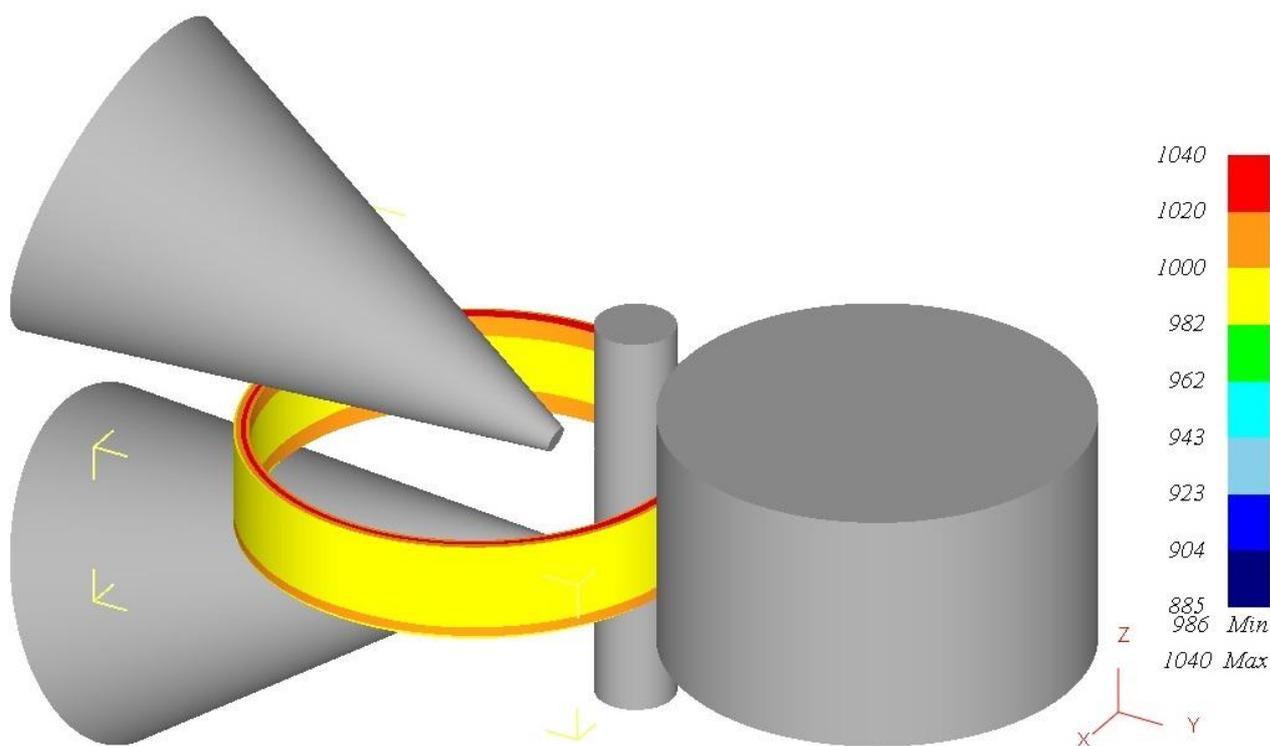


Рисунок 4.5. Визуализация конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольца (распределение температуры кольца)

Для обеспечения этого условия используем итерационный процесс для определения  $\Delta h$ . Опишем этот процесс. Зададимся начальной величиной  $\Delta h = \eta$ . Будем давать некоторое приращение величине  $\Delta h$  и вычислять соответствующее значение  $V_d$ . Начальная величина приращения  $d\Delta h$  пусть также будет равна  $\eta$ .

Наращивая  $\Delta h$  с шагом  $d\Delta h$  может оказаться, что при некотором значении  $\Delta h$  условие (4.1) выполнится, значит поиск  $\Delta h$  можно прекратить.

Если этого не произошло, продолжаем наращивать  $\Delta h$  до тех пор, пока соответствующее значение  $V_d$  не превысит  $Sr$  более чем на  $\delta$ . Тогда приращение  $d\Delta h$  делим на 2 и с этим приращением начинаем уменьшать значение  $\Delta h$ .

Если окажется, что значение  $V_d$  меньше  $Sr$  более чем на  $\delta$ , текущее приращение  $d\Delta h$  снова делим на 2 и с этим приращением начинаем увеличивать  $\Delta h$ .

Таким образом, приращение  $d\Delta h$  делим на 2 каждый раз, когда увеличение обжатия  $\Delta h$  изменяем на его уменьшение, а также когда уменьшение обжатия  $\Delta h$

изменяем на его увеличение. Этот процесс продолжаем до тех пор, пока не выполнится условие (4.1).

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

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

– предложен усовершенствованный метод выполнения расчетов параметров процесса прокатки кольцевых заготовок 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.

#### **4.1.2. Проверка адекватности усовершенствованного метода**

Расчетные величины суммарных радиальных обжатий, обеспечившие выполнение условия (4.1), представлены на рисунке 4.6.

Установлено, что среднее отклонение расчетной величины скорости роста наружного диаметра кольца (см. рисунок 4.7) от экспериментальной составляет 12,2 %.

Максимальное отклонение расчетной величины наружного диаметра прокатанного кольца (см. рисунок 4.8) от экспериментальной составляет 2%. Среднее отклонение расчетной величины силы прокатки (см. рисунок 4.9) от экспериментальной составляет 12%.

Максимальное отклонение расчетной величины температуры поверхности кольца (см. рисунок 4.10) от экспериментальной составляет 2%.

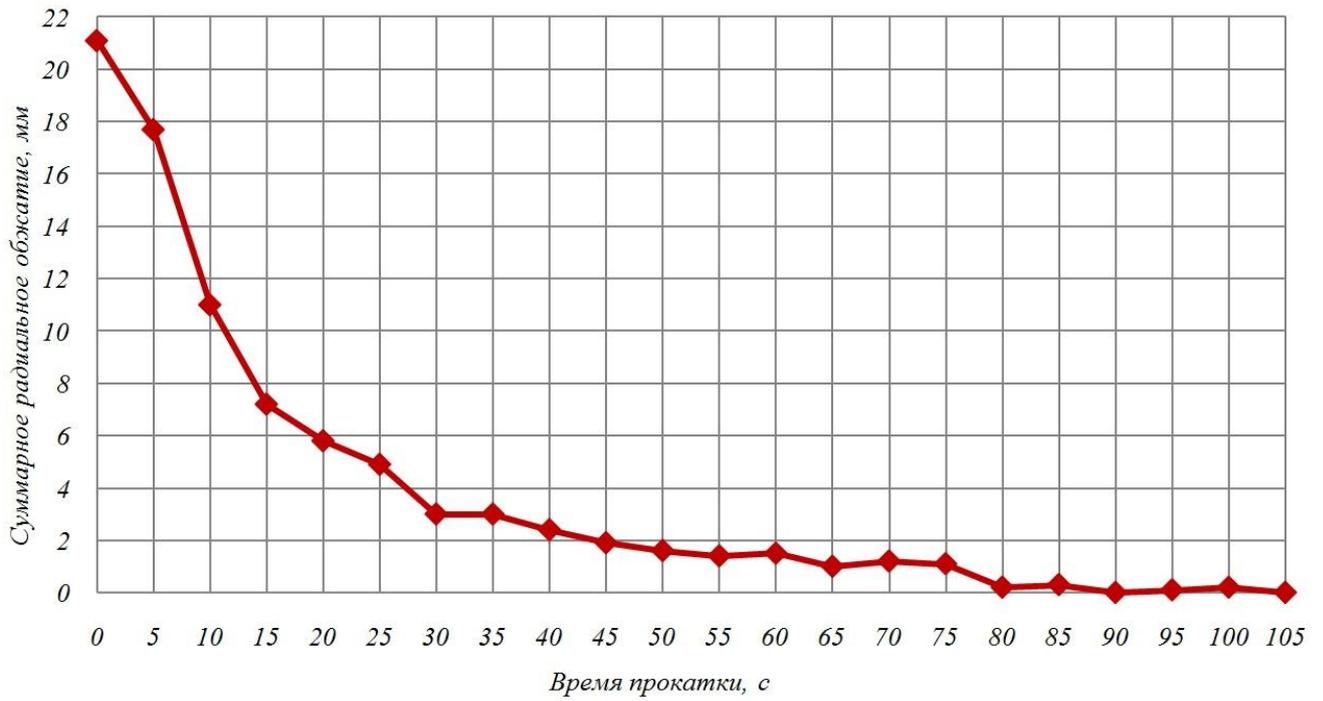


Рисунок 4.6. Зависимость расчетной величины суммарного радиального обжатия от времени прокатки

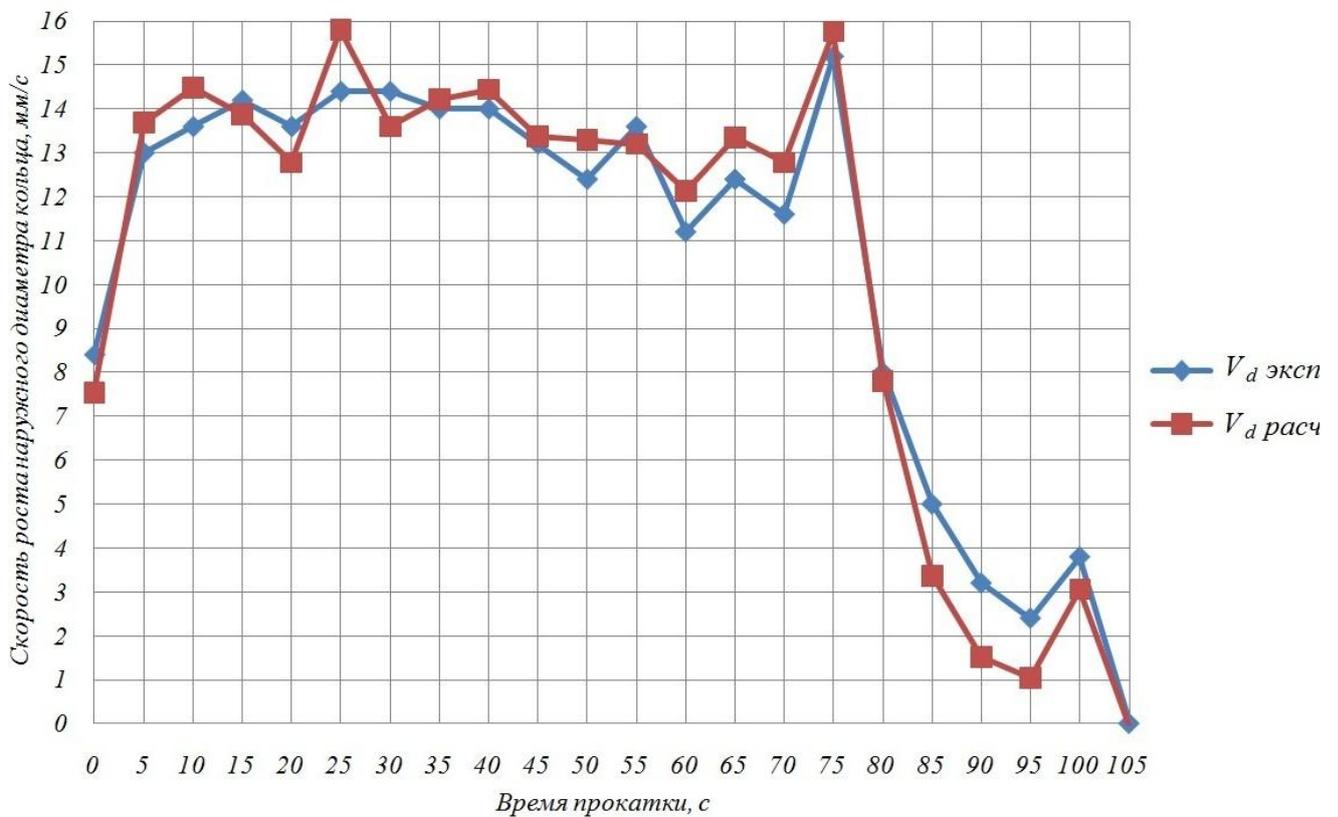


Рисунок 4.7. Зависимость скорости роста наружного диаметра кольца от времени прокатки

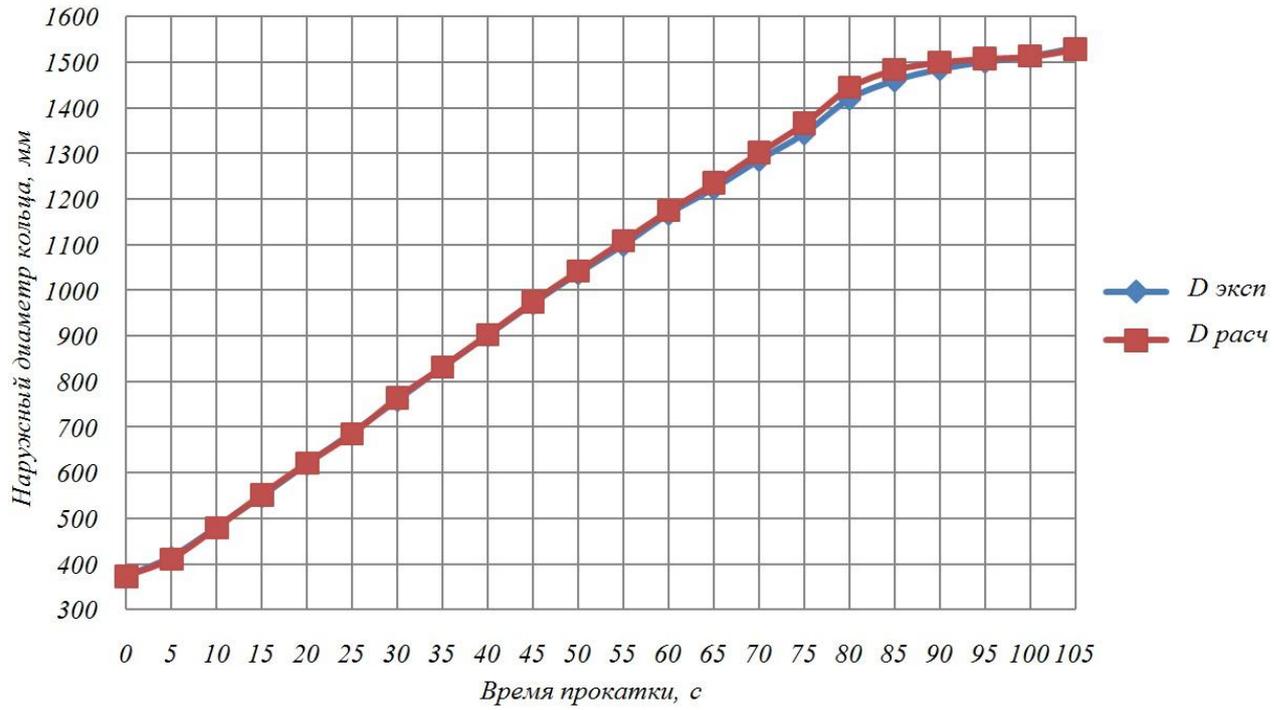


Рисунок 4.8. Зависимость наружного диаметра кольца от времени прокатки

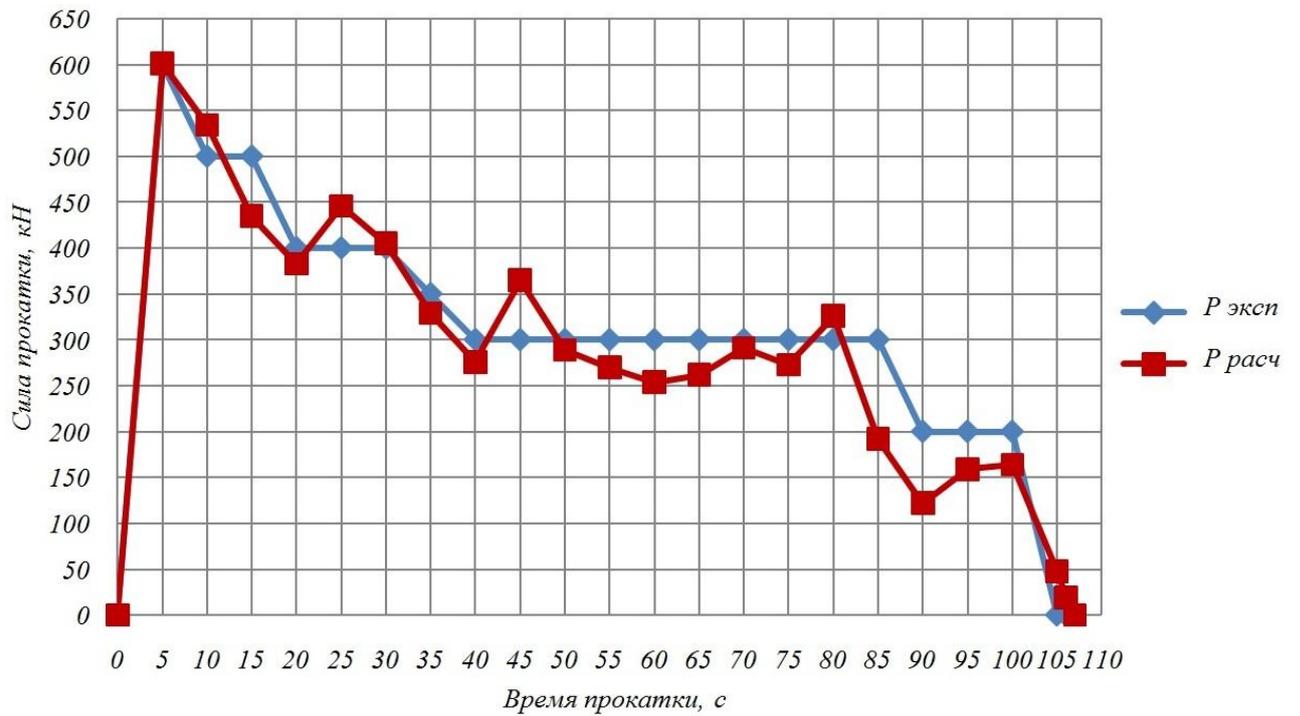


Рисунок 4.9. Зависимость силы прокатки от времени

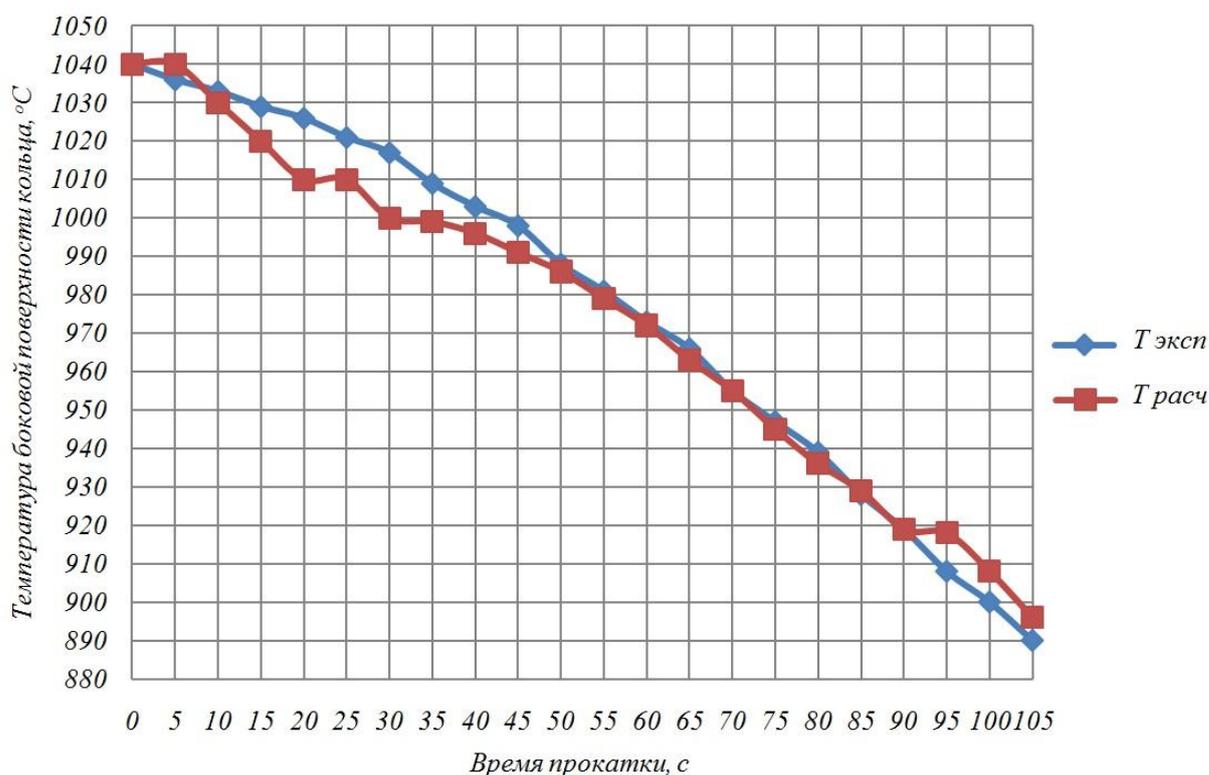


Рисунок 4.10. Зависимость температуры боковой поверхности кольца от времени прокатки

## 4.2. Кольца с наружным гребнем на примере фланца

### 4.2.1. Экспериментальные исследования процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане

Методика проведения эксперимента изложена в подразделе 2.4. Выполним анализ полученных результатов, представленных на рисунках 4.11 – 4.13.

На 1-ом этапе прокатки, при изменении внутреннего диаметра кольцевой заготовки от 260 мм до 291 мм) выполнено устранение разнотолщинности, которая была получена при ее штамповке и прошивке центрального отверстия. Величина радиального обжатия при этом составила 5 мм. Скорость роста внутреннего диаметра кольца увеличилась с нуля до 5,5 мм/с. Сила прокатки выросла с нуля до 206,2 кН. Небольшая величина радиального обжатия связана с тем, что на этом этапе прокатки выполнялся разгон приводного двигателя главного вала с 0 до 540 об/мин, а кольцо совершило ~1 оборот.

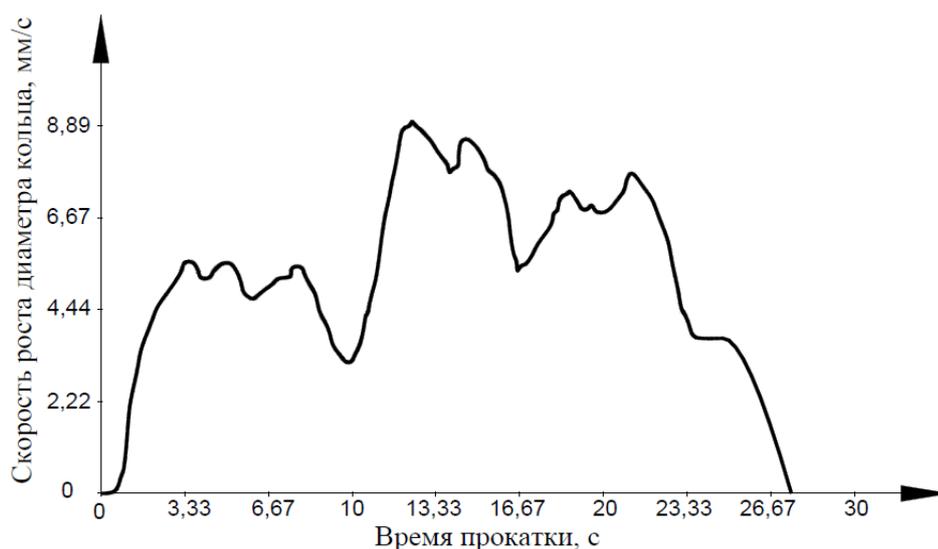


Рисунок 4.11. Зависимость скорости роста внутреннего диаметра кольца от времени прокатки

На 2-ом основном этапе прокатки, который характеризуется интенсивным радиальным обжатием металла, внутренний диаметр кольца изменяется от 291 мм до 462 мм (время  $t$  изменяется от 3,3 с до 21,1 с).

Вначале при изменении внутреннего диаметра кольца от 291 мм до 355 мм ( $t$  изменяется от 3,3 с до 9,9 с) выполняется выкатка гребня кольца за  $\sim 5,5$  оборотов. При этом, как видно из рисунков 4.11, 4.13, несмотря на постоянный рост силы прокатки до 587,2 кН, скорость роста внутреннего диаметра кольца снижается до 3,2 мм/с. Это связано, прежде всего, с тем, что на этой стадии прокатки валок-оправка контактирует с прокатываемым кольцом по всей его высоте (см. рисунок 2.8), тогда как главный валок, имеющий ручей, соответствующий прокатываемому профилю, контактирует с наружной боковой поверхностью кольца только в зоне дуги с радиусом 14 мм (рисунки 2.9, 4.14) между кольцевой и гребневой частями профиля. В связи с этим, суммарное (от вертикальных валков) радиальное обжатие кольца (9,5 мм, рисунок 4.12) на данной стадии реализуется преимущественно главным валком. Это объясняется тем, что при равенстве сил прокатки со стороны каждого из вертикальных валков и меньшей площади контакта металла с главным валком, контактное давление с его стороны будет значительно большим, чем со стороны валка-оправки. После того, как гребневая часть ручья

главного валка полностью заполнилась металлом, увеличилась высота контакта наружной боковой поверхности кольца с главным валком. Поэтому на следующей стадии прокатки при изменении внутреннего диаметра кольца от 355 до 399 мм ( $t$  изменяется от 9,9 с до 14,5 с) и росте силы прокатки до максимального значения, равного 770,6 кН, скорость роста внутреннего диаметра кольца выросла вначале до 9 мм/с, а затем после небольшого её уменьшения выросла до 8,6 мм/с. При этом за  $\sim 4$  оборота кольца его толщина уменьшилась с 99,8 мм до 78,5 мм, что соответствует значительному радиальному обжатию, равному 21,3 мм (см. рисунок 4.12).

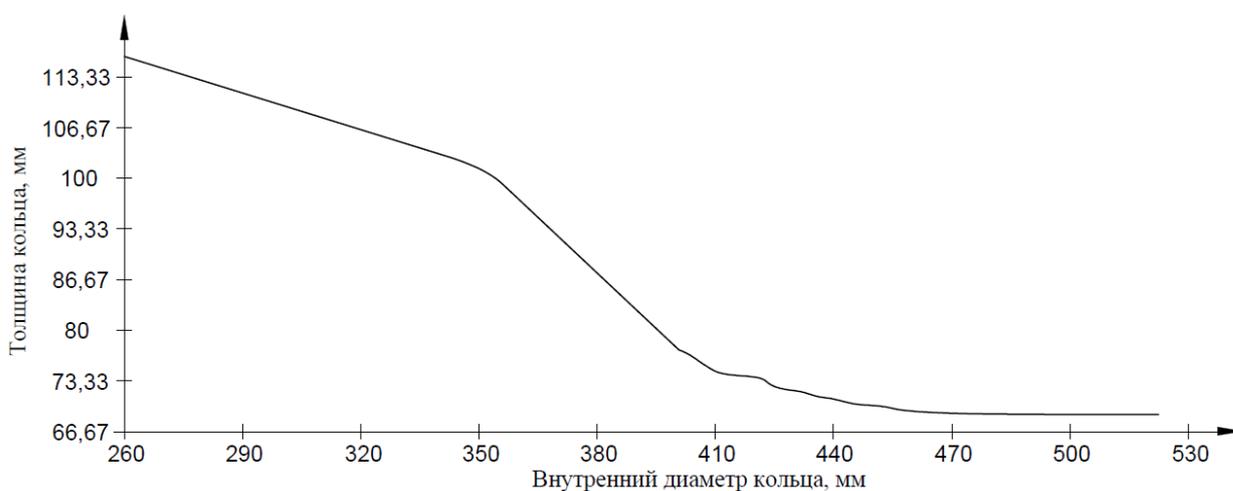


Рисунок 4.12. Зависимость толщины кольца от его внутреннего диаметра в процессе прокатки

Необходимо отметить, что следствием интенсивного радиального обжатия металла и увеличения скорости роста диаметра кольца является рост овальности кольца, а также его разнотолщинности, что проявляется в «просаживании» на следующей стадии прокатки (при изменении внутреннего диаметра кольца от 399 мм до 418 мм ( $t$  изменяется от 14,5 с до 16,6 с)) скорости роста внутреннего диаметра кольца с 8,6 мм/с до 5,4 мм/с. Начиная с этой стадии сила прокатки уже только снижается от своего максимального значения (770,6 кН). При изменении внутреннего диаметра кольца от 418 мм до 462 мм ( $t$  изменяется от 16,6 с до

21,1 с) сила прокатки уменьшилась до 505,8 кН, скорость роста внутреннего диаметра кольца увеличилась до 7,7 мм/с, а толщина кольца уменьшается до 69,7 мм.

На 3-ем этапе прокатки (при изменении внутреннего диаметра кольца от 462 мм до 499 мм ( $t$  изменяется от 21,1 с до 25 с)) обеспечивается переход от 2-го (основного) этапа, связанного с интенсивной деформацией металла, к последнему 4-му этапу, на котором получают требуемые размеры готового кольца. При этом на первой стадии 3-его этапа (при изменении внутреннего диаметра кольца от 462 мм до 485 мм ( $t$  изменяется от 21,1с до 23,5 с)) сила прокатки продолжила снижаться от 505,8 кН до 402,7 кН, а скорость роста внутреннего диаметра кольца значительно уменьшилась с 7,7 до 3,9 мм/с, что обеспечило за  $\sim 2$  оборота кольца уменьшение полученных на предыдущем этапе его разнотолщинности и овальности.

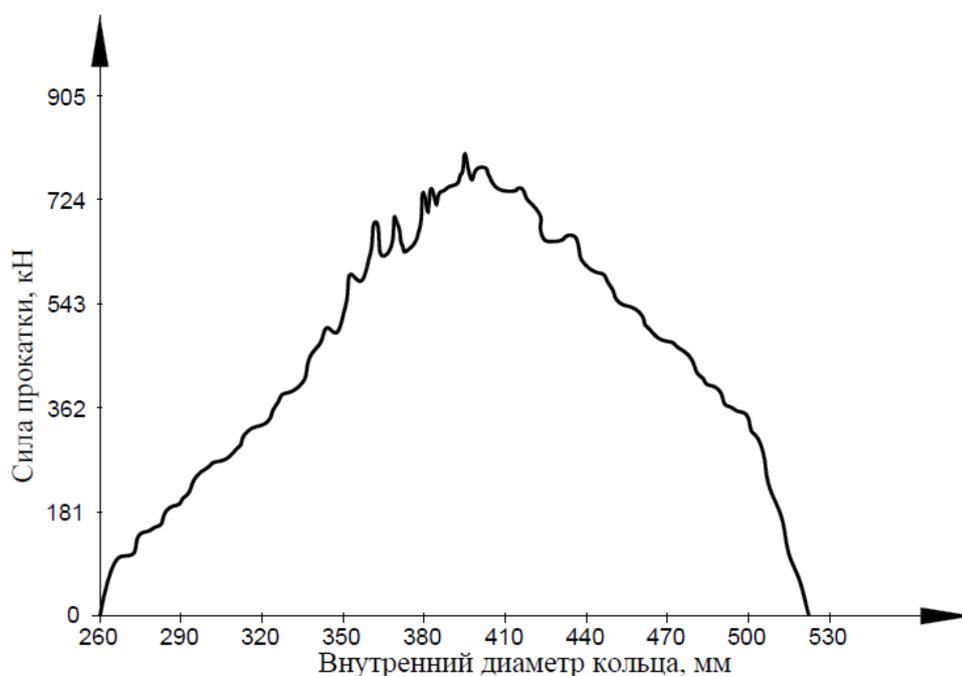


Рисунок 4.13. Зависимость силы прокатки от внутреннего диаметра кольца

Толщина кольца в конце этой стадии 3-го этапа получена равной 69,3 мм. На второй стадии 3-его этапа (при изменении внутреннего диаметра кольца от 485 мм до 499 мм ( $t$  изменяется от 23,5с до 25 с)), которая выполнялась за  $\sim 1$  оборот кольца, межвалковый зазор (рисунок 4.12) практически не менялся (радиальное обжатие составило 0,2 мм). Сила прокатки продолжила снижаться от 402,7 кН

до 351,3 кН. При этом в течение 1,5 с обеспечивалось поддержание постоянной скорости роста внутреннего диаметра кольца на уровне 3,7 мм/с за счет устранения его разнотолщинности и обжатия металла, идущего в уширение при осевом обжатии кольца наклонными валками.

На 4-ом, заключительном этапе прокатки (при изменении внутреннего диаметра кольца от 499 мм до 520 мм ( $t$  изменяется от 25 с до 27,4 с)) сила прокатки и скорость роста внутреннего диаметра кольца в течение  $\sim 1$  оборота кольца продолжились снижаться. При достижении внутреннего диаметра кольца  $\sim 515$  мм был начат сброс давления рабочей жидкости в рабочих гидроцилиндрах стана, что привело к падению до нуля силы прокатки (рисунок 4.13) и, соответственно, уменьшению до нуля скорости роста внутреннего диаметра кольца (рисунок 4.12). Увеличение внутреннего диаметра кольцевой заготовки с 515 мм до 520 мм при неизменном межвалковом зазоре обеспечило минимизацию разнотолщинности и овальности кольца.

Наружный диаметр кольца в процессе его прокатки замерялся на расстоянии 62,5 мм от боковой (гребневой) поверхности кольца (рисунок 2.9). На указанном расстоянии замерялась и толщина кольца в процессе прокатки. Так на готовом профиле толщина кольца равна 69 мм (рисунок 2.9), а на кольцевой заготовке (рисунок 2.10) – 116 мм.

Высота исходной кольцевой заготовки (рисунок 2.10) равна высоте готового кольца (рисунок 2.9). Поэтому в процессе прокатки зазор между наклонными валками выдерживался постоянным, равным 114 мм. При этом на каждом обороте кольца наклонными валками выполнялось обжатие уширения, которое получали от радиального обжатия металла вертикальными валками.

Построенные графические зависимости скорости роста внутреннего диаметра кольца от времени, толщины кольца и силы прокатки в зависимости от текущего внутреннего диаметра кольца показали характер изменения параметров при нестационарном процессе прокатки. Выполнен анализ механизмов влияния сил прокатки и, соответственно, скорости роста диаметра кольца, на процессы формоизменения металла на различных этапах прокатки кольца.

#### 4.2.2. Конечно-элементное моделирование процесса прокатки кольца с наружным гребнем на радиально-осевом кольцепрокатном стане

Конечно-элементное моделирование процесса прокатки кольца с наружным гребнем (рисунки 4.14, 4.15) выполнено с учетом условий проведения эксперимента на радиально-осевом кольцепрокатном стане, которые указаны в подразделе 2.4. Результаты экспериментальных исследований представлены в пункте 4.2.1.

Процесс прокатки кольцевых заготовок на кольцепрокатном стане реализован в программной среде DEFORM 3D. Построение модели осуществляли в шаблоне Ring Rolling. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец выполнена в подразделе 2.1. В пункте 4.1.1 выполнено усовершенствование метода моделирования. Визуализация моделирования процесса прокатки фланца представлена на рисунках 4.14, 4.15.

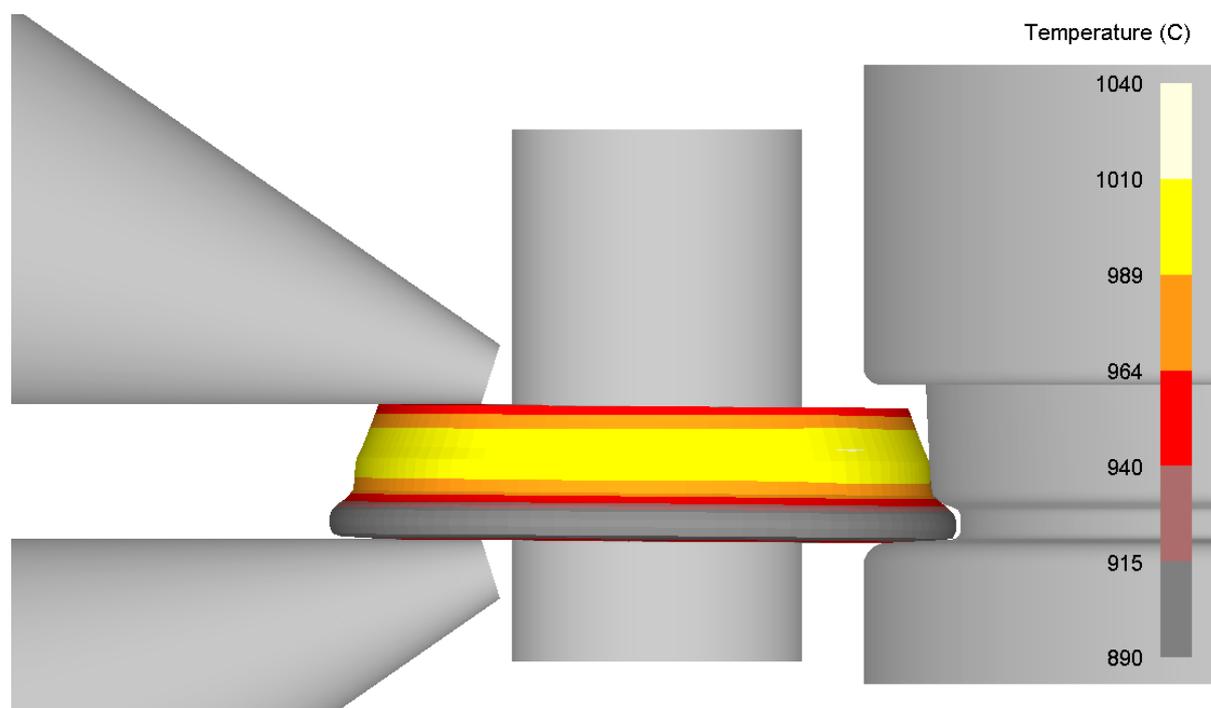


Рисунок 4.14. Визуализация конечно-элементного моделирования процесса прокатки фланца (распределение температуры кольца)

Расчетные (при конечно-элементном моделировании) и экспериментальные графические зависимости показаны на рисунках 4.16, 4.18. Зависимости овально-

сти и разнотолщинности от времени прокатки, установленные на базе конечно-элементного моделирования, представлены на рисунке 4.19.

Как показал анализ полученных результатов (рисунки 4.16 – 4.18) выполненная адаптация метода конечно-элементного моделирования и его совершенствование позволили достаточно корректно описать основные закономерности изучаемого процесса прокатки.

Полученные при конечно-элементном моделировании зависимости толщины кольца от времени адекватно описывают характер формоизменения металла, установленный экспериментальным путем (рисунок 4.16). Среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 1%.

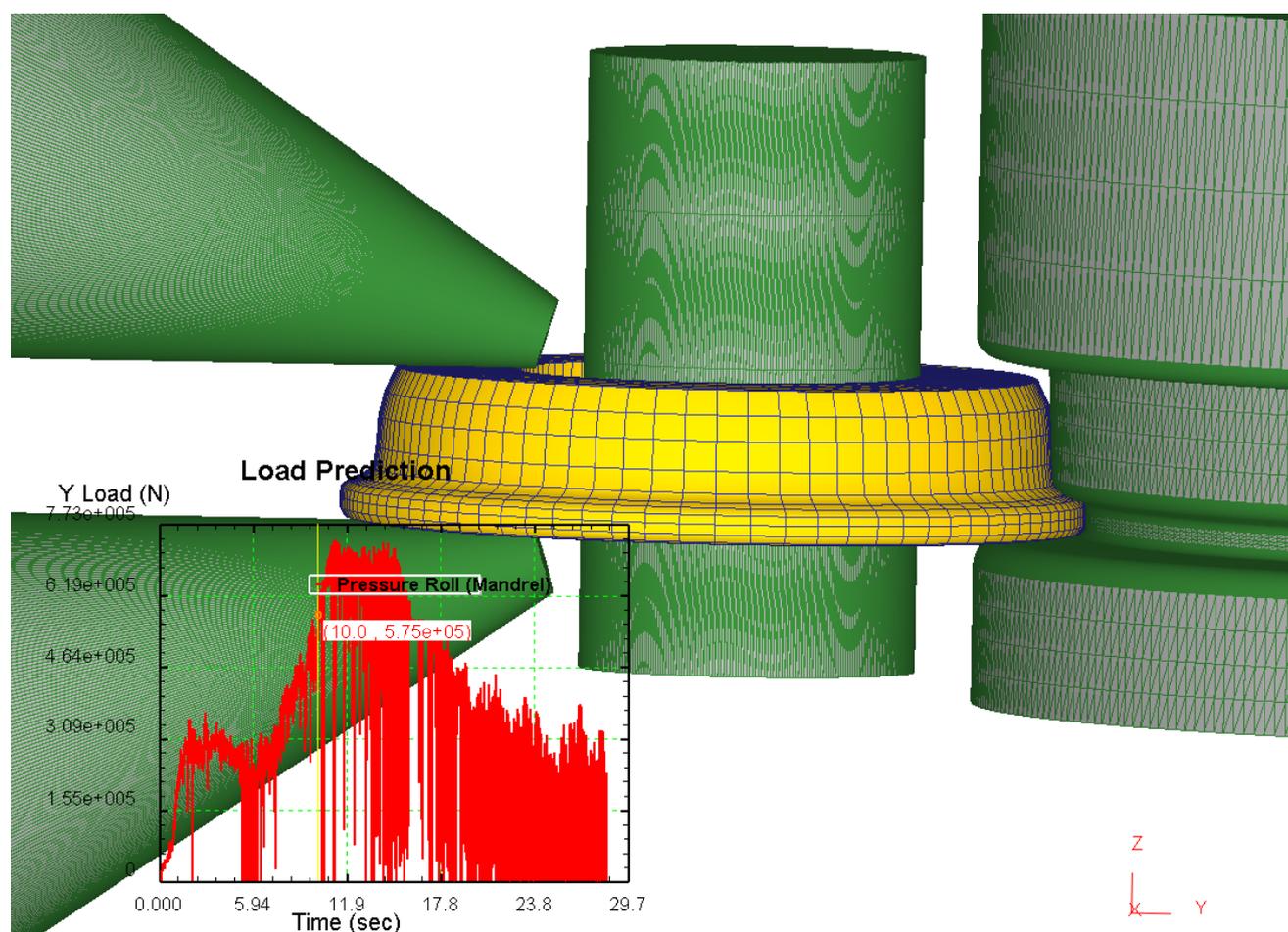


Рисунок 4.15. Визуализация конечно-элементного моделирования процесса прокатки фланца (распределение силы прокатки)

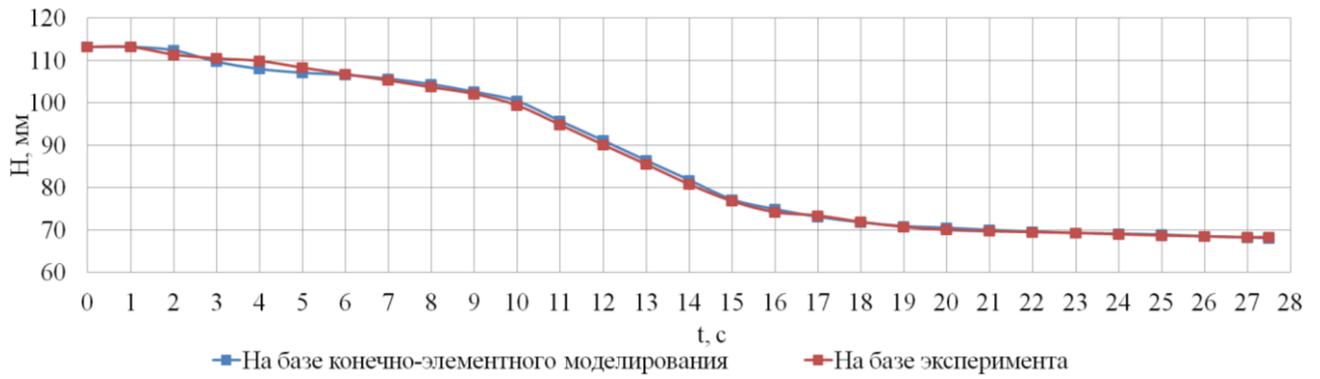


Рисунок 4.16. Зависимости толщины кольца от времени процесса прокатки

Зависимость внутреннего диаметра кольца от времени процесса прокатки представлена на рисунке 4.17.

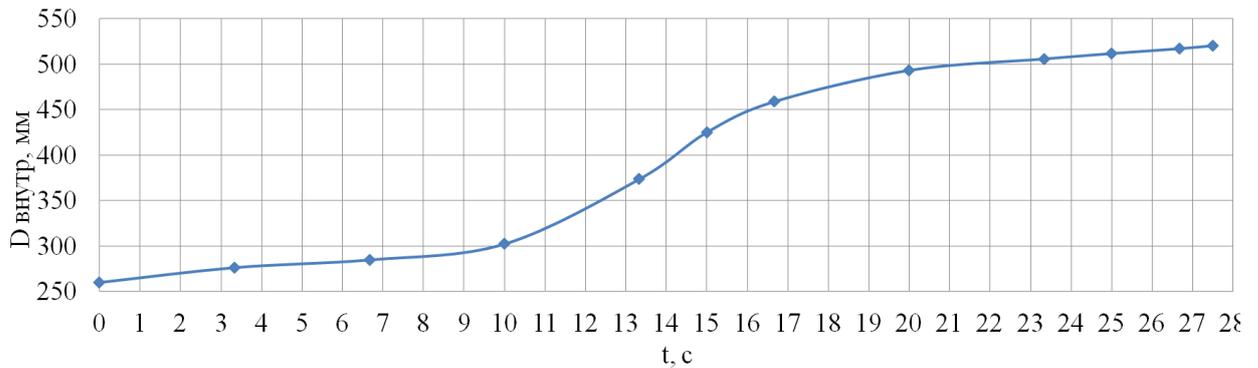


Рисунок 4.17. Зависимость внутреннего диаметра кольца от времени процесса прокатки

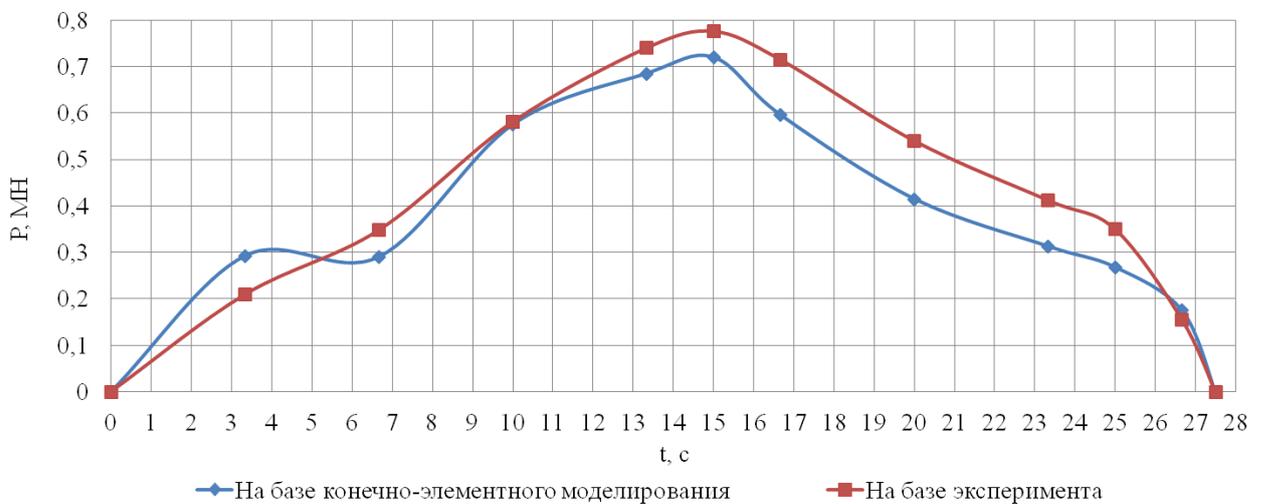


Рисунок 4.18. Зависимости силы прокатки в радиальном очаге деформации от времени процесса прокатки

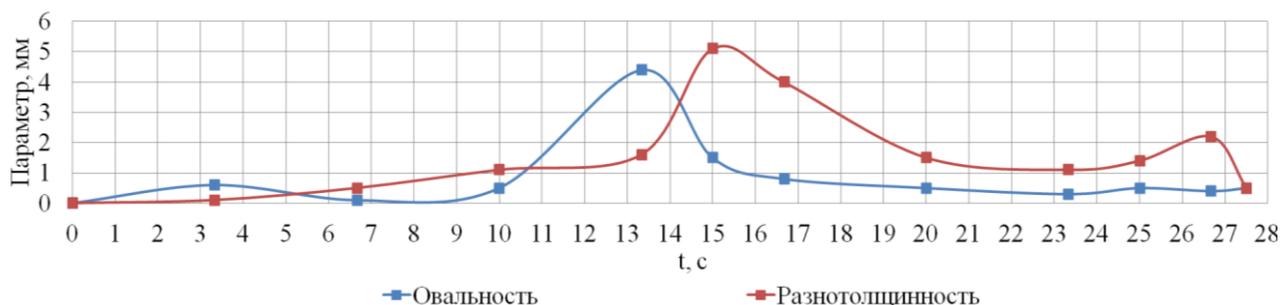
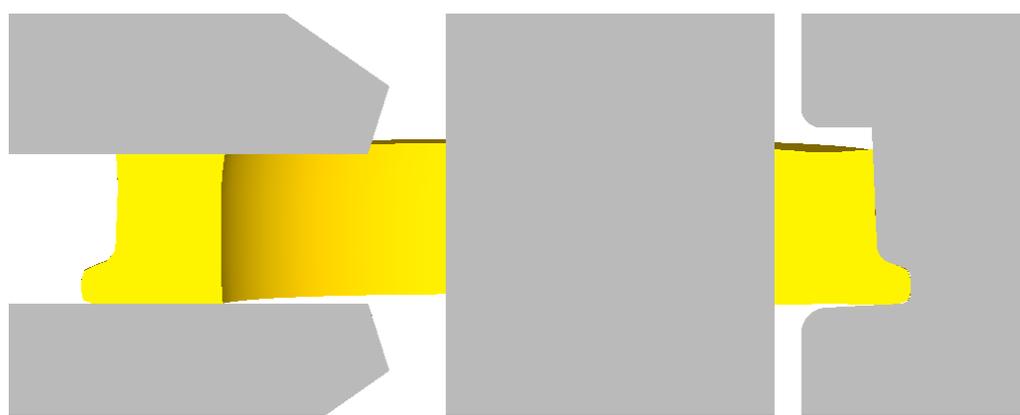


Рисунок 4.19. Зависимости овальности и разнотолщинности от времени прокатки, установленные на базе конечно-элементного моделирования

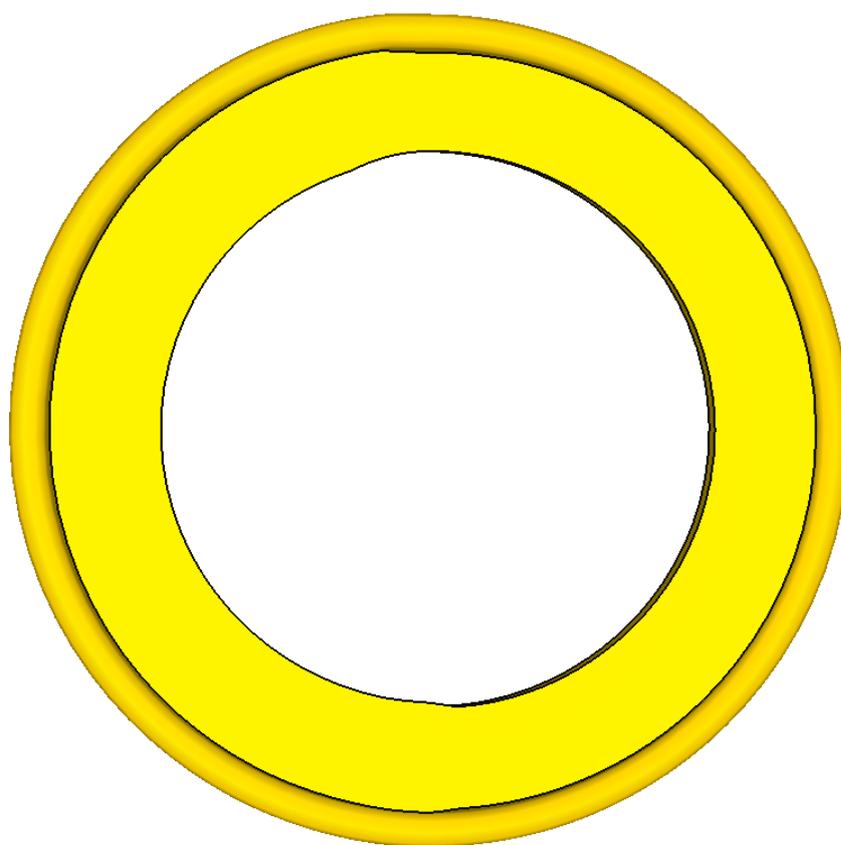
Полученный при моделировании характер изменения силы прокатки в радиальном очаге деформации в качественном отношении достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным (рисунок 4.18). Среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышают 15%.

Анализ полученных результатов также показал, что существующий режим прокатки, который реализован при выполнении эксперимента, характеризуется достаточно интенсивными радиальными обжатиями, в первую очередь на этапе по времени с 10-ти до 15 с (рисунок 4.16). На этом этапе, соответственно, имеет место интенсивный рост диаметра прокатываемого кольца (рисунок 4.17) и силы прокатки (рисунок 4.18). Такой режим за счет большой неравномерности деформации (обжатий и вытяжек) в течение одного оборота заготовки приводит, во-первых, к некоторому наклону кольца относительно горизонтальной плоскости (рисунок 4.20 а) и, во-вторых, к интенсивному росту его овальности и разнотолщинности (рисунки 4.19 и 4.20 б).

На завершающем этапе прокатки (который начинается с 25-ой и завершается 27 с имеет место повторный рост разнотолщинности и овальности кольца (рисунок 4.19), который связан уже с интенсивным снижением силы прокатки (рисунок 4.18) и, соответственно, с ростом неравномерности деформации. Поэтому получаемые параметры разнотолщинности и овальности не могут достигнуть значений менее 0,5 – 1 мм.



а



б

Рисунок 4.20. Формоизменение кольца на этапе прокатки, соответствующем по времени 15 с: а – наклон кольца относительно горизонтальной плоскости; б – асимметрия кольца после интенсивной раскатки по диаметру

Рассмотренный выше режим прокатки обеспечивает, прежде всего, высокую производительность процесса. Вместе с тем, отсутствие устойчивой тенденции к минимизации разнотолщинности и овальности прокатываемой заготовки на завершающей стадии прокатки является недостатком.

## Выводы

1. Совершенствование метода моделирования процесса прокатки кольцевых заготовок на радиально-осевом кольцепрокатном стане заключается в следующем:

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

- предложен усовершенствованный метод выполнения расчетов параметров процесса прокатки кольцевых заготовок 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.

2. 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, наружного диаметра кольца, силы прокатки и температуры боковой поверхности кольца в зависимости от времени) соответствует экспериментальным кривым. Средние относительные отклонения расчетных значений от экспериментальных не превышают 12%.

3. 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 от времени, толщины кольца и силы прокатки в зависимости от времени показали характер изменения параметров при нестационарном процессе прокатки. Установлен механизм влия-

ния 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 кольца с наружным гребнем (фланца) на радиально-осевом кольцепрокатном стане. Полученные зависимости толщины кольца от времени адекватно описывают характер формоизменения металла, установленный экспериментальным путем (рисунок 4.16). 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. Среднее относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышают 15 %.

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. Рассмотренный режим прокатки обеспечивает высокую производительность процесса. 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 мм) обеспечивается менее интенсивным снижением силы прокатки и, соответственно, скорости роста диаметра кольца на завершающих (3-ем и 4-ом) этапах прокатки.

Материалы настоящего раздела опубликованы в работах [115, 116, 117, 121].

## РАЗДЕЛ 5

### РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ КОЛЕЦ

#### 5.1. Математическая модель процесса прокатки колец

Разработка математической модели процесса прокатки колец (рисунок 2.1) выполнена с целью создания специализированной компьютерной программы расчета рациональных режимов деформации металла, ориентированных на учет особенностей работы программ, управляющих кольцепрокатными станами. Важной особенностью является реализация схемы прокатки, которая предусматривает ряд этапов. Рассмотрим схему, включающую четыре этапа.

На 1-ом этапе предусматривается несколько ( $m$ ) оборотов исходной кольцевой заготовки, нагретой до температуры горячей пластической деформации. При этом обжатие металла выполняется только вертикальными валками. Если исходная кольцевая заготовка получена ковкой, то на 1-ом этапе выполняется устранение её граней. При этом увеличивается диаметр кольцевой заготовки, что позволяет уже на следующем этапе прокатки выполнять обжатие металла также и наклонными валками.

Управляющая кольцепрокатным станом программа на 1-ом этапе обеспечивает режим обжатия металла, при котором сила прокатки  $P$  в радиальном очаге деформации изменяются от нуля до некоторого значения, с которого выполняется дальнейшая прокатка на 2-м этапе.

Количество оборотов  $m$  и величина скорости роста диаметра кольца  $V_d$  после их выполнения являются исходной информацией для расчетов.

За первые  $m$  оборотов высота кольца увеличивается за счет уширения металла, которое имеет место в радиальном очаге деформации вертикальных валков. Суммарное уширение ( $U$ ), полученное после  $m$  оборотов кольца, и соответствующие наружный диаметр кольца ( $D_1$ ), а также величины  $H_1$  и  $B_1$  – толщина

и высота кольца, при которых заканчивается 1-ый этап прокатки, являются результатами предварительных расчетов, выполняемых по ходу прокатки.

Основные расчеты выполняются против хода прокатки на 4-ом, 3-ем, а затем и 2-ом этапах.

В заключение выполняется итерационный цикл расчетов на 1-ом этапе, обеспечивающий соответствие параметров кольца и процесса прокатки при объединении 1-го и 2-го этапов.

На 2-ом (основном) этапе прокатки, который реализуется до получения наружного диаметра кольца  $D_2 = K_3 \cdot D_k$  (где  $D_k$  наружный диаметр готового кольца;  $K_3$  – коэффициент, равный, например,  $K_3 = 0,90-0,96$ ), выполняются обжатия металла вертикальными и наклонными валками. При этом управляющая станом программа выдерживает заданную, например, постоянную скорость роста диаметра кольца  $V_d$ . Известна максимально допустимая скорость роста диаметра кольца на этом этапе, например,  $V_d = 40 \text{ мм/с}$  и максимально допустимая скорость движения валка-оправки, например,  $V_{opr} = 10 \text{ мм/с}$ . Текущее значение скорости  $V_d$  и соответствующие обжатия на каждом обороте кольца рассчитываются с учетом сопоставления ряда расчетных величин с соответствующими допустимыми по силе и мощности прокатки, скорости движения валка-оправки, напряжениям в бочке валка-оправки и др.

Скорость роста наружного диаметра кольца зависит от величины обжатия  $\Delta h$ . При расчете режима деформации потребуем, чтобы выполнялось условие:  $|V_d - S_r| < \delta$ , (здесь  $S_r$  – требуемое значение скорости роста наружного диаметра кольца;  $\delta$  – заданная величина, определяющая точность выхода при расчете на требуемую скорость роста наружного диаметра кольца).

Для обеспечения этого условия используем итерационный процесс для определения обжатия в радиальном очаге деформации  $\Delta h$ . Опишем этот процесс. Зададимся начальной величиной  $\Delta h = \eta$ . Будем давать некоторое приращение величине  $\Delta h$  и каждый раз вычислять на ее основе другие величины, (которые будут рассмотрены ниже), а затем и соответствующее значение  $V_d$ . Начальная ве-

личина приращения  $d\Delta h$  пусть также будет также равна  $\eta$  (например, величина  $\eta=0,1\text{мм}$ ).

Наращивая  $\Delta h$  с шагом  $d\Delta h$  может оказаться, что при некотором значении  $\Delta h$  условие  $|V_d - Sr| < \delta$ , выполнится, значит поиск  $\Delta h$  можно прекратить.

Если этого не произошло, продолжаем наращивать  $\Delta h$  до тех пор, пока соответствующее значение  $V_d$  не превысит  $Sr$  более чем на  $\delta$ . Тогда приращение  $d\Delta h$  делим на 2 и с этим приращением начинаем уменьшать значение  $\Delta h$ .

Если окажется, что значение  $V_d$  меньше  $Sr$  более чем на  $\delta$ , текущее приращение  $d\Delta h$  снова делим на 2 и с этим приращением начинаем увеличивать  $\Delta h$ .

Таким образом, приращение  $d\Delta h$  делим на 2 каждый раз, когда увеличение обжатия  $\Delta h$  изменяем на его уменьшение, а также когда уменьшение обжатия  $\Delta h$  изменяем на его увеличение. Этот процесс продолжаем до тех пор, пока не выполнится указанное выше условие.

Изложенный подход применяется на каждом обороте кольца, причем на всех этапах процесса прокатки. Отличие заключается только в том, что на 1-ом и 4-ом этапах обеспечивается только выход на требуемую скорость роста наружного диаметра кольца. А на 2-ом и 3-ем этапах после выхода на требуемую скорость роста наружного диаметра кольца дополнительно выполняются сопоставления ряда расчетных величин с соответствующими допустимыми по силе и мощности прокатки, скорости движения валка-оправки, напряжениям в бочке валка-оправки и др. Соответственно, если имеет место превышение расчетными величинами соответствующих допустимых, то скорость роста наружного диаметра кольца корректируется в сторону уменьшения. Если же все расчетные величины оказались меньше допустимых, то скорость роста наружного диаметра кольца корректируется в сторону увеличения. При этом обеспечивается нормируемое непревышение хотя бы одной расчетной величины по отношению к соответствующей допустимой.

На 3-ом этапе прокатки, который реализуется до получения наружного диаметра кольца  $D3 = K4 \cdot Dk$  (где  $K4$  – коэффициент, равный, например,

$K_4=0,97-0,98$ ), также выполняются обжатия металла вертикальными и наклонными валками. Этот этап обеспечивает плавный переход от 2-го (основного) этапа, связанного с интенсивной деформацией металла, к последнему 4-му этапу, на котором получают требуемые размеры готового кольца и достигается его минимальная разнотолщинность и овальность. При этом управляющая станом программа выдерживает заданную, например, постоянную скорость роста диаметра кольца  $V_d$ . Известна максимально допустимая скорость роста диаметра кольца на этом этапе, например,  $V_d = 16 \text{ мм/с}$ . Текущее значение скорости  $V_d$  и соответствующие обжатия рассчитываются с учетом сопоставления ряда расчетных величин с соответствующими допустимыми по силе и мощности прокатки, скорости движения вала-оправки, напряжениям в бочке вала-оправки, разнотолщинности кольца.

На 4-ом этапе, который реализуется путем обжатия металла в радиальном и осевом очагах, получают готовые наружный диаметр кольца  $D_k$ , а также его толщину  $H_k$  и высоту  $B_k$ . Известна скорость роста наружного диаметра кольца на этом этапе, которая выдерживается постоянной, например,  $V_d = 1,6 \text{ мм/с}$ .

Рассмотрим порядок выполнения предварительных расчетов режима деформации кольца по ходу прокатки на 1-ом этапе.

Для этого выполним разработку формул. Вначале определим толщину исходной кольцевой заготовки, учитывая равенство объемов заготовки и готового кольца, на основе уравнения (5.1)

$$2\pi \left( \frac{DV}{2} + \frac{H_z}{2} \right) \cdot H_z \cdot B_z = 2\pi \left( \frac{D_k}{2} - \frac{H_k}{2} \right) \cdot H_k \cdot B_k, \quad (5.1)$$

где  $DV$ ,  $H_z$ ,  $B_z$  – внутренний диаметр, толщина и высота исходной кольцевой заготовки, соответственно;

$D_k$ ,  $H_k$ ,  $B_k$  – наружный диаметр, толщина и высота готового кольца, соответственно.

После преобразования уравнения (5.1) получим квадратное уравнение относительно  $H_z$  :

$$H_z^2 + DV \cdot H_z - \frac{(Dk - Hk) \cdot Hk \cdot Bk}{Bz} = 0. \quad (5.2)$$

Из двух решений квадратного уравнения (5.2) выбираем следующее:

$$H_z = -\frac{DV}{2} + \sqrt{\frac{DV^2}{4} + \frac{(Dk - Hk) \cdot Hk \cdot Bk}{Bz}}. \quad (5.3)$$

Разработанный метод, как указано выше, предусматривает задание в качестве исходной информации значения скорости роста наружного диаметра кольца  $V_d$  после выполнения первых  $m$  оборотов, то есть на границе 1-го и 2-го этапов прокатки. Очевидно, что, исходя из конструктивных соображений, задать точное значение  $V_d$  в указанной точке практически невозможно. Поэтому после завершения предварительных расчетов по ходу прокатки для 1-го этапа выполняются основные расчеты против хода прокатки на 4-ом, 3-ем и 2-ом этапах. При этом определяется скорость роста наружного диаметра кольца  $V_d$  на границе 1-го и 2-го этапов прокатки, причем с учетом неперевышения на 2-м этапе ряда допустимых параметров (по силе и мощности прокатки, скорости движения валка-оправки, напряжениям в бочке валка-оправки). Затем, повторно выполняются расчеты по ходу прокатки для 1-го этапа, то есть для первых  $m$  оборотов. Организовав итерационный цикл расчетов по ходу прокатки на 1-ом этапе, обеспечивается уточненное определение размеров кольца, а также значения скорости  $V_d$  в конце 1-го этапа с соответствующими имеющимися параметрами кольца и процесса, полученными при расчете против хода прокатки.

Скорость роста диаметра кольца  $V_{di}$  на каждом  $i$ -том обороте (из заданных  $m$ ) определяется формулой:

$$V_{di} = \frac{D_{i+1} - D_i}{\Delta t_i}, \quad (5.4)$$

где  $D_i$  и  $D_{i+1}$  – наружные диаметры кольца в начале  $i$ -того и  $(i + 1)$ -го оборота, соответственно;  $\Delta t_i$  – время оборота кольца.

Зная линейную скорость вращения приводного валка  $V$ , можно определить время оборота кольца по формуле:

$$\Delta t_i = \frac{\pi D_i}{(V \cdot 1000)}. \quad (5.5)$$

Тогда:

$$V_{di} = \frac{(D_{i+1} - D_i) \cdot V \cdot 1000}{\pi D_i}. \quad (5.6)$$

Из формулы (5.6) найдем  $D_{i+1}$ :

$$D_{i+1} = D_i \cdot \left( 1 + \frac{\pi \cdot V d_i}{V \cdot 1000} \right). \quad (5.7)$$

Как указано выше на 1-ом этапе прокатки при обжатии металла вертикальными валками кольцо совершает  $m$  оборотов, и на последнем из них скорость роста диаметра кольца равна  $V_d$ . Вначале примем, что на каждом  $i$ -том обороте

$$V_{di} = i \cdot \frac{V_d}{m}, \quad (i = 1, 2 \dots m).$$

Из равенства объемов  $i$ -того и готового кольца определим радиальное обжатие  $\Delta H_i$  на каждом обороте по формуле (5.8), записанной с учетом, что:

$$\begin{aligned}
H_{i+1} &= H_i - \Delta H_i, \text{ а } B_{i+1} = B_i + k_p \cdot \Delta H_i. \\
2\pi \left( \frac{D_{i+1}}{2} - \frac{(H_i - \Delta H_i)}{2} \right) \cdot (H_i - \Delta H_i) \cdot (B_i + k_p \cdot \Delta H_i) &= \\
&= 2\pi \left( \frac{Dk}{2} - \frac{Hk}{2} \right) \cdot Hk \cdot Bk, \tag{5.8}
\end{aligned}$$

где  $k_p$  – показатель уширения на  $i$ -том обороте, равный отношению величины уширения к величине обжатия  $\Delta H_i$  в очаге деформации вертикальных валков. Значение коэффициента  $k_p$  на каждом обороте рассчитывается по эмпирической зависимости, полученной на основе экспериментальных данных.

После преобразования уравнения (5.8) получим кубическое уравнение относительно  $\Delta H_i$ :

$$a_0 \cdot \Delta H_i^3 + b_0 \cdot \Delta H_i^2 + c_0 \cdot \Delta H_i + d_0 = 0, \tag{5.9}$$

где  $a_0 = k_p$ ;

$$b_0 = (D_{i+1} - H_i) \cdot k_p - (H_i \cdot k_p - B_i);$$

$$c_0 = -((D_{i+1} - H_i) \cdot (H_i \cdot k_p - B_i) + H_i \cdot B_i);$$

$$d_0 = -(D_{i+1} - H_i) \cdot H_i \cdot B_i + (Dk - Hk) \cdot Hk \cdot Bk.$$

Для нахождения решения уравнения (5.9) применили метод половинного деления, который основан на последовательном сужении интервала, содержащего корень указанного уравнения до того момента, пока не будет достигнута заданная точность. В общем случае, для функции  $f(x)$  реализация этого метода заключается в следующем. Предварительно определяется область локализации корня на некотором отрезке  $[a, b]$ , на границах которого функция  $f(x)$  меняет знак. Этот отрезок разбивается пополам  $x = (a + b) / 2$ . Затем находят значения функции  $f(a)$  и  $f(x)$  и проверяется условие  $f(a) \cdot f(x) < 0$ . Если условие выполнено, то

корень расположен на отрезке  $[a, x]$ . В этом случае необходимо точку  $b$  переместить в точку  $x$  ( $b = x$ ). Если условие не выполнено, то корень расположен на отрезке  $[x, b]$  и тогда  $a = x$ . Повторяем вышеописанный процесс до тех пор, пока значение  $abs(f(x))$  не станет меньше наперед заданного числа.

На каждом обороте найдем величину уширения металла в очаге деформации вертикальных валков, как произведение коэффициента  $k_p$  на величину радиального обжатия  $\Delta H_i$ . Просуммировав значения уширений на первых  $m$  оборотах, получим величину суммарного уширения, на которую увеличится высота кольца по сравнению с высотой исходной кольцевой заготовки. При этом также определим наружный диаметр кольца  $D_1$ , полученный через указанные  $m$  оборотов, который считается как концом 1-го этапа, так и началом следующего 2-го этапа прокатки.

Описанный выше алгоритм является начальным шагом в итерационном процессе нахождения наружного диаметра  $D_1$ . То есть, вначале скорость роста диаметра кольца (и соответствующие наружные диаметры  $D_i$ ) при расчете по ходу прокатки на каждом обороте определили на основе, указанной выше, линейной зависимости. Массив найденных на этом шаге значений наружных диаметров  $D_i$  сохраняется.

Затем линейную зависимость уточнили параболической, которая имеет вид  $V_{di} = A1 \cdot (D_i - DN)^2 + C1$ , где  $A1 = \frac{(V_d - V_{d1})}{(D1 - DN)^2}$ ,  $C1 = V_{d1}$ , ( $i = 1, 2 \dots m$ ).

В качестве  $D_i$  берутся значения из массива, полученного на предыдущем шаге. Найденные по параболической зависимости значения  $V_{di}$  используются для вычисления наружных диаметров кольца по формуле (7), в том числе и нового диаметра  $D_1$ . Процесс продолжается до тех пор, пока разница между новым значением диаметра  $D_1$  и тем, что был получен на предыдущей итерации, не станет меньше требуемого наперед заданного числа, например равного 0.1 мм.

Информация о размерах кольца (толщина, высота, наружный диаметр), полученная на каждом из  $m$  оборотов на 1-ом этапе, сохраняется в виде массивов. В

дальнейшем она будет использоваться после выполнения основных расчетов режима деформации кольца против хода прокатки на 4-ом, 3-ем, и 2-ом этапах прокатки.

Рассмотрим порядок выполнения основных расчетов режима деформации кольца против хода прокатки на 4-ом, 3-ем, и 2-ом этапах.

Обозначим на  $i$ -том обороте толщину, высоту и наружный диаметр кольца как  $H_i, B_i, D_i$ . При  $i = 1$   $H_1 = Hk$ ,  $B_1 = Bk$ ,  $D_1 = Dk$ .

Запишем формулы определения толщины, высоты и наружного диаметра кольца на  $(i + 1)$ -ом обороте с учетом того, что расчет выполняется против хода прокатки. На каждом обороте выполняется как радиальное, так и осевое обжатие. В этом случае формулы имеют следующий вид:

$$H_{i+1} = H_i + \Delta H_i - k_o \cdot \Delta B_i; \quad B_{i+1} = B_i + \Delta B_i - k_p \cdot \Delta H_i, \quad (5.10)$$

где  $k_o$  – показатель уширения на  $i$ -том обороте, равный отношению величины уширения к величине обжатия в очаге деформации наклонных валков. Значение коэффициента  $k_o$  на каждом обороте рассчитывается по эмпирической зависимости, полученной на основе экспериментальных данных.

Из условия равенства объемов кольца на  $(i + 1)$ -ом обороте и готового кольца определим величину  $D_{i+1}$ :

$$D_{i+1} = \frac{(Dk - Hk) \cdot Hk \cdot Bk}{H_{i+1} \cdot B_{i+1}} + H_{i+1}. \quad (5.11)$$

На 4-ом, 3-ем и 2-ом этапах выполняются радиальные  $\Delta H_i$  и осевые  $\Delta B_i$  обжатия. Каждый из этапов начинается, когда наружный диаметр кольца достигает определенного значения.

Будем рассматривать этапы против хода прокатки и для каждого из них запишем формулы (5.10) в зависимости от обжатий. Очевидно, что вид формулы (5.11) не изменится.

На каждом обороте 4-го и 3-го этапов прокатки величина осевого обжатия металла наклонными валками  $\Delta B_i$  равна уширению в радиальном очаге, то есть  $\Delta B_i = \Delta b_i = k_p \cdot \Delta H_i$ .

3-ий этап прокатки обеспечивает плавный переход от 2-го (основного) этапа, связанного с интенсивной деформацией металла, к последнему 4-му этапу, на котором получают требуемые размеры и минимальную разнотолщинность и овальность прокатанного кольца. В связи с этим для колец, имеющих высоту, равную, больше или меньше высоты исходной кольцевой заготовки применяется схема, согласно которой именно в конце 2-го этапа прокатки (то есть при наружном диаметре кольца, равном  $D_2$ ) во всех указанных выше вариантах уже обеспечивается получение требуемой высоты  $B_k$ . При этом вся неравномерность деформации металла, в том числе связанная с выходом на требуемую высоту кольца, локализуется на 2-ом (основном) этапе прокатки. А на 3-ем и 4-ом этапах осевые обжатия выполняются для получения катаных торцов кольца и высоты, равной  $B_k$ , которая на каждом обороте кольца нарушается вследствие уширения металла, возникающего от соответствующего радиального обжатия в очаге деформации вертикальных валков.

Так как на каждом обороте 4-го и 3-го этапов прокатки величина осевого обжатия металла наклонными валками  $\Delta B_i$  принята равной уширению в радиальном очаге, то формулы (5.10) примут вид:

$$H_{i+1} = H_i + \Delta H_i \cdot (1 - k_o k_p); \quad B_{i+1} = B_i. \quad (5.12)$$

Рассмотрим 2-ой (основной) этап прокатки. Режим обжатий на этом этапе зависит от соотношения толщин и высот кольцевой заготовки и готового кольца.

На рисунке 5.1 представлен вариант, когда высота заготовки  $B_z$  больше или равна высоте готового кольца  $B_k$ .

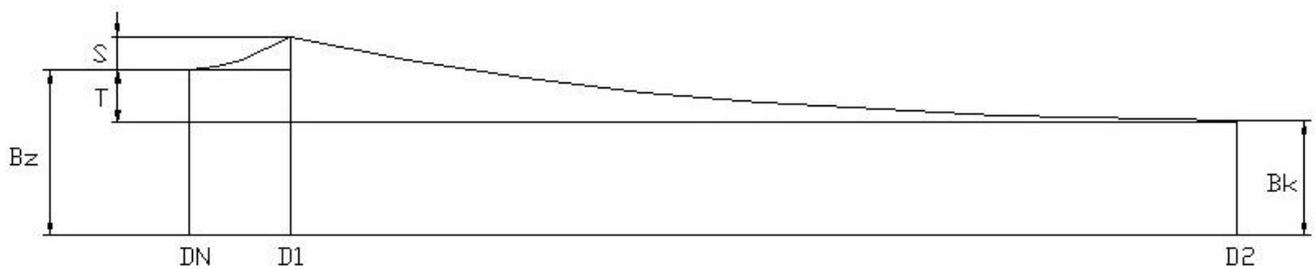


Рисунок 5.1. Схема (при  $B_z > B_k$ ) изменения части высоты кольца  $B_{i+1}$  на 2-ом этапе прокатки, полученной после выполнения осевого обжатия уширения металла в радиальном очаге, равного  $\Delta b_i = k_p \cdot \Delta H_i$

На рисунке 5.1 показано суммарное уширение металла  $S$ , которое получено в результате обжатия толщины кольца вертикальными валками на 1-ом этапе прокатки за  $m$  оборотов. Оно привело к увеличению высоты кольца на эту же величину.

Высота исходной кольцевой заготовки может, как равняться высоте готового кольца, так и превышать ее на некоторую величину  $T$ . Поэтому на 2-ом этапе прокатки на каждом обороте кольца наклонными валками обжимается не только уширение  $\Delta b_i = k_p \cdot \Delta H_i$ , получаемое от обжатия вертикальными валками, но и соответствующие части высоты кольца, обусловленные величинами  $S$  и  $T$ , так как это показано на рисунке 5.1. В общем случае высота кольца на каждом обороте 2-го этапа прокатки зависит, как от уширения  $\Delta b_i$ , так и от величин  $S$  и  $T$ .

Из рисунка 5.1 следует: если наружный диаметр кольца равен  $D_1$ , то высота кольца равна  $B_k + S + T$ ; если наружный диаметр кольца равен  $D_2$ , то высота кольца равна  $B_k$ . Примем, что изменение на 2-ом этапе прокатки части величины осевого обжатия, обусловленного суммой  $S + T$ , рассчитывается по параболе. На рисунке 5.1 показано изменение  $B_{i+1}$ , являющейся частью высоты кольца, полученной после выполнения осевых обжатий уширений  $\Delta b_i$ . Так как величина  $B_k = const$ , то указанная часть высоты кольца ( $B_{i+1}$ ) тоже изменяется по параболе, вершина которой находится в точке  $(D_2, B_k)$ . То есть  $B_{i+1}$  плавно увеличивается от  $B_k$  до  $B_1$ , где  $B_1 = B_z + S$ .

Уравнение для вычисления  $B_{i+1}$  имеет вид:

$$B_{i+1} = A \cdot (D_{i+1} - D_2)^2 + C, \text{ где } A = \frac{(B_1 - B_2)}{(D_1 - D_2)^2}, C = B_2. \quad (5.13)$$

Для расчета величины  $B_{i+1}$ , необходимо задать диаметр  $D_{i+1}$ . В качестве первичного значения  $D_{i+1}$  найдем то, которое удовлетворяет условию  $\Delta B_i = \Delta b_i = k_p \cdot \Delta H_i$ , то есть по существу величины  $H_{i+1}$ ,  $B_{i+1}$  вначале рассчитываются по формулам (5.12). Подставляя найденное таким образом значение  $D_{i+1}$  в уравнение (5.13), находим уточненное значение  $B_{i+1}$ .

Используя это значение  $B_{i+1}$  на текущем обороте и  $B_i$  на предыдущем, на основании формулы (5.10) можем записать, что суммарное осевое обжатие  $\Delta B_i$  равно:

$$\Delta B_i = B_{i+1} - B_i + k_p \cdot \Delta H_i. \quad (5.14)$$

То есть осевое обжатие на каждом обороте 2-ого этапа прокатки включает две составляющие:  $\Delta b = \Delta b_1 = k_p \cdot \Delta H$ ;  $\Delta b_2 = B_{i+1} - B_i$

С учетом (5.14) формула (5.10) для вычисления  $H_{i+1}$  примет вид:

$$H_{i+1} = H_i + \Delta H_i - k_o \cdot (B_{i+1} - B_i + k_p \cdot \Delta H_i). \quad (5.15)$$

С учетом найденных по формулам (5.13) и (5.15) величин  $H_{i+1}$ ,  $B_{i+1}$ , уточненное значение  $D_{i+1}$  определяем по формуле (5.11).

На следующем этапе на базе уточненного значения  $D_{i+1}$  по формулам (5.13) и (5.15) пересчитываются величины  $H_{i+1}$ ,  $B_{i+1}$ , а по ним снова пересчитывается

диаметр  $D_{i+1}$  по формуле (5.11). Организованный таким образом итерационный цикл позволяет определить значение наружного диаметра  $D_{i+1}$  с требуемой наперед заданной точностью.

На рисунке 5.2 представлен вариант, когда высота заготовки  $B_z$  меньше высоты готового кольца  $B_k$ .

Может оказаться, что суммарное уширение  $S$  будет таким, что  $B_z + S > B_k$ . Тогда величины  $B_{i+1}$ ,  $H_{i+1}$  на 2-ом этапе прокатки рассчитываются по формулам (5.13) и (5.15), а диаметр  $D_{i+1}$  по формуле (5.11).

Если  $B_z + S = B_k$ , то очевидно, что величины  $H_{i+1}$ ,  $B_{i+1}$  на 2-ом этапе прокатки рассчитываются по формулам (5.12), а диаметр  $D_{i+1}$  по формуле (5.11).

Если  $B_z + S < B_k$  (рисунок 5.2), то выход на высоту кольца, равную  $B_k$ , в ряде случаев можно выполнить, если на каждом обороте 2-го этапа прокатки обжимать наклонными валками не все уширение, полученное от радиального обжатия, а только его часть. То есть:

$$\Delta B_i = \Delta b_i = (k_p \cdot \Delta H_i) \cdot k_y, \quad (5.16)$$

где  $k_y$  – коэффициент, изменяющийся от 0 до 1, который определяет долю уширения, полученного от радиального обжатия, обжимаемую в осевом очаге деформации.

При  $k_y = 1$  на каждом обороте 2-го этапа прокатки наклонными валками будет обжиматься все уширение. Например, если  $k_y = 0,3$ , то наклонными валками будет обжиматься только 30% уширения, полученного от радиального обжатия на рассматриваемом обороте, а 70% уширения будет использовано для требуемого увеличения высоты кольца.

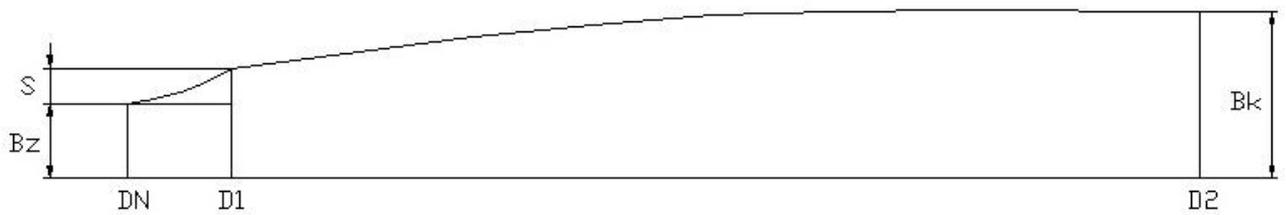


Рисунок 5.2. Схема (при  $Bz < Bk$ ) изменения части высоты кольца  $B_{i+1}$  на 2-ом этапе прокатки, полученной после выполнения неполного осевого обжатия уширения, полученного в радиальном очаге деформации  $\Delta b_i = (k_p \cdot \Delta H_i) \cdot k_y$

В этом случае высота  $B_{i+1}$  от точки, соответствующей наружному диаметру кольца  $D2$ , до точки, соответствующей наружному диаметру кольца  $D1$ , должна плавно уменьшаться, приближаясь к величине  $(Bz + S)$ .

С учетом (5.16) формулы (5.10) для вычисления  $H_{i+1}$  и  $B_{i+1}$  примут вид:

$$H_{i+1} = H_i + \Delta H_i \cdot (1 - k_o \cdot k_p \cdot k_y), \quad B_{i+1} = B_i + k_p \cdot \Delta H_i \cdot (k_y - 1). \quad (5.17)$$

Значение диаметра кольца  $D_{i+1}$  определяем по формуле (5.11).

Так как торцевые поверхности кольца должны быть катаные, то коэффициент  $k_y$  всегда должен быть больше нуля. Вместе с тем, даже при минимально допустимом из технологических условий значении коэффициента  $k_y$ , выход на высоту готового кольца  $Bk$  можем быть и не обеспечен. В этом случае на соответствующем графике (аналогичном показанному на рисунке 5.2) при значении наружного диаметра кольца, равного  $D1$ , будет иметь место разрыв. То есть при подходе справа к точке  $D1$  будет получено, что  $B_{i+1} > Bz + S$ . В этом случае путем повторных расчетов необходимо найти минимально допустимую высоту исходной кольцевой заготовки  $Bz$ , при которой требуемое условие ( $B_{i+1} = Bz + S$  в точке  $D1$ ) выполняется. Причем скорректированное значение  $Bz$  в каждом из таких расчетов задается через исходную информацию.

Рассчитывая размеры кольца против хода прокатки получим, что на определенном обороте наружный диаметр кольца становится меньше  $D_1$  – диаметра, после которого наступает 1-ый этап прокатки. В этом случае сохраняем информацию о размерах прокатываемого кольца, которая получена на 2-ом этапе прокатки, до перехода через диаметр  $D_1$ . Очевидно, что наружный диаметр на сохраненном последнем обороте будет, как правило, несколько больше, чем диаметр  $D_1$ .

Скорость  $V_d$ , которая получена и сохранена на последнем обороте 2-го этапа при расчете против хода прокатки (до перехода через диаметр  $D_1$ ), найдена с учетом непревышения ряда допустимых параметров (по силе и мощности прокатки, скорости движения валка-оправки, напряжениям в бочке валка-оправки).

Очевидно, что заданная в исходной информации из конструктивных соображений скорость  $V_d$  (после первых  $m$  оборотов), которая была принята во внимание при предварительных расчетах на 1-ом этапе, (выполненных по ходу прокатки), как правило, не будет равна указанной выше скорости.

Поэтому предусмотрен ряд повторных расчетов для 1-го этапа (по ходу прокатки). Причем выполняется итерационный цикл расчетов, с целью получения после первых  $m$  оборотов кольца значения диаметра  $D_1$ , равного диаметру, полученному на 2-ом этапе прокатки на последнем сохраненном обороте (при расчете против хода прокатки). Это обеспечивается варьированием скорости роста диаметра кольца после первых  $m$  оборотов (которая задается в исходной информации). После выполнения указанного условия достигается равенство не только рассмотренных выше диаметров, но и всех других параметров кольца и процесса.

Затем из информации, полученной на 1-ом этапе по ходу прокатки, исключаем ту, что относится к обороту под номером  $m$  (соответствующую уточненному диаметру  $D_1$ ). Оставшуюся по 1-му этапу информацию присоединяем к той, что получена на предыдущих этапах (4-ом, 3-ем и 2-ом) при расчете против хода прокатки. Очевидно, что при этом обеспечивается наилучший вариант объединения 1-го этапа с 2-ым, так как исключенная информация по 1-му этапу (при рас-

чете по ходу прокатки) полностью совпадает с сохраненной информации по последнему обороту на 2-ом этапе (при расчете против хода прокатки).

Предложенный метод расчета режима деформации, обеспечивающий соответствие параметров кольца и процесса прокатки при объединении 1-го и 2-го этапов, учитывает точные размеры исходной кольцевой заготовки и готового кольца. Это связано с тем, что расчеты по 1-му этапу (по ходу прокатки) начинаются с размеров исходной кольцевой заготовки, а расчеты по 4-му, 3-му и 2-му (против хода прокатки) начинаются с размеров готового кольца.

Разработанная математическая модель процесса прокатки колец, учитывающая 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.

Учтена возможность расчета режима деформации металла при прокатке колец, имеющих высоту, равную, больше или меньше высоты исходной кольцевой заготовки. Высота кольцевой заготовки является исходной информацией для расчетов. Так как высота заготовки на первом этапе задается конструктивно, то результаты расчетов могут показать, что на ее основе невозможно прокатать требуемое готовое кольцо. При этом их анализ позволит установить какую корректировку необходимо выполнять: по увеличению, или по уменьшению высоты исходной кольцевой заготовки. Может потребоваться несколько корректировок, в том числе, и ее толщины, которые в итоге позволят определить необходимые размеры исходной кольцевой заготовки.

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, разнотолщинности кольца (оцениваемой на каждом обороте в очагах вертикальных и наклонных валков соответствующими обжатиями) и выполнение при этом корректировок радиальных и осевых обжатий 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.

В приложении А на рисунке А.1 представлена исходная информация, которую использовали для расчета (на базе представленной математической модели и соответствующей компьютерной программы) режима деформации кольца, для которого в работе [87] имеются результаты эксперимента, выполненного в промышленных условиях.

На рисунках 5.3 – 5.5 представлены расчетные и экспериментальные кривые для скорости движения валка-оправки, скорости роста наружного диаметра кольца и толщине кольца в зависимости от его наружного диаметра. На рисунке 5.6 представлены расчетные и экспериментальные кривые для наружного диаметра кольца в зависимости от времени прокатки. Качественный ход расчетных кривых соответствует экспериментальным. 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 наружного диаметра кольца – 21 %, что позволяет использовать предложенную компьютерную программу на практике для совершенствования технологии прокатки колец.

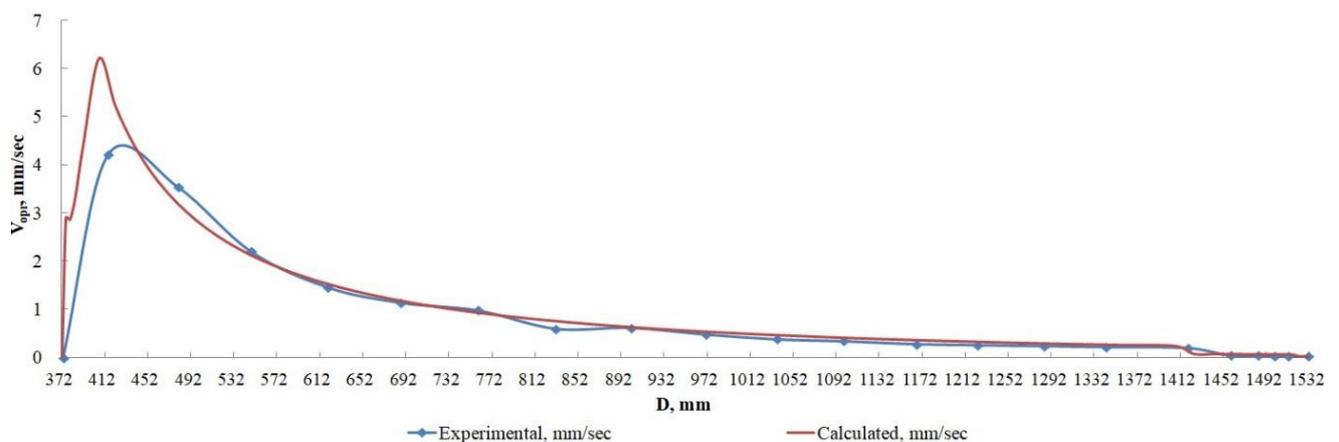


Рисунок 5. 3. Зависимость скорости движения валка-оправки  $V_{opr}$  от текущего значения наружного диаметра кольца  $D$

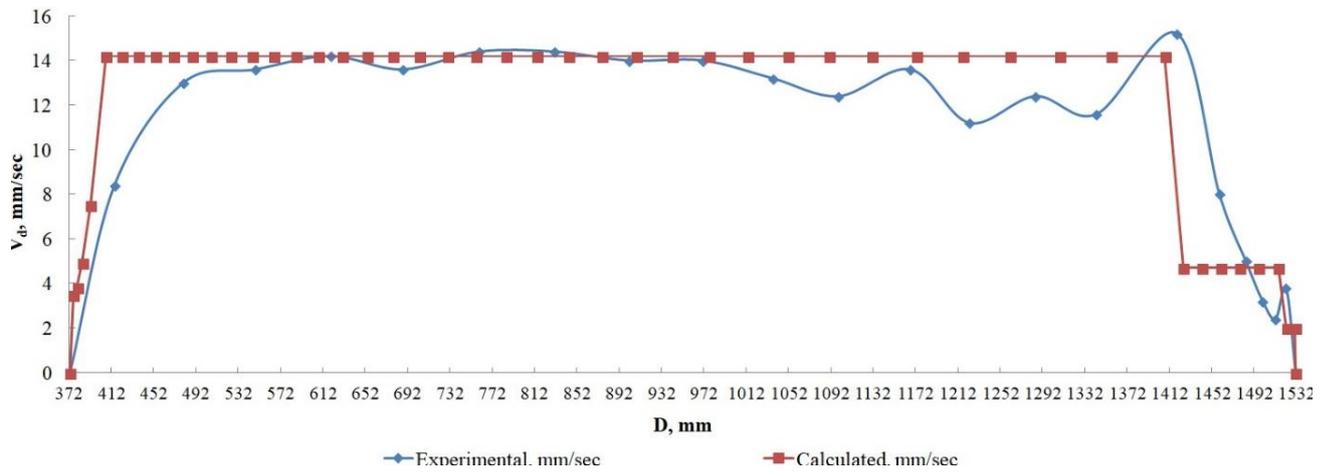


Рисунок 5. 4. Зависимость скорости роста наружного диаметра кольца  $V_d$  от текущего значения наружного диаметра кольца  $D$

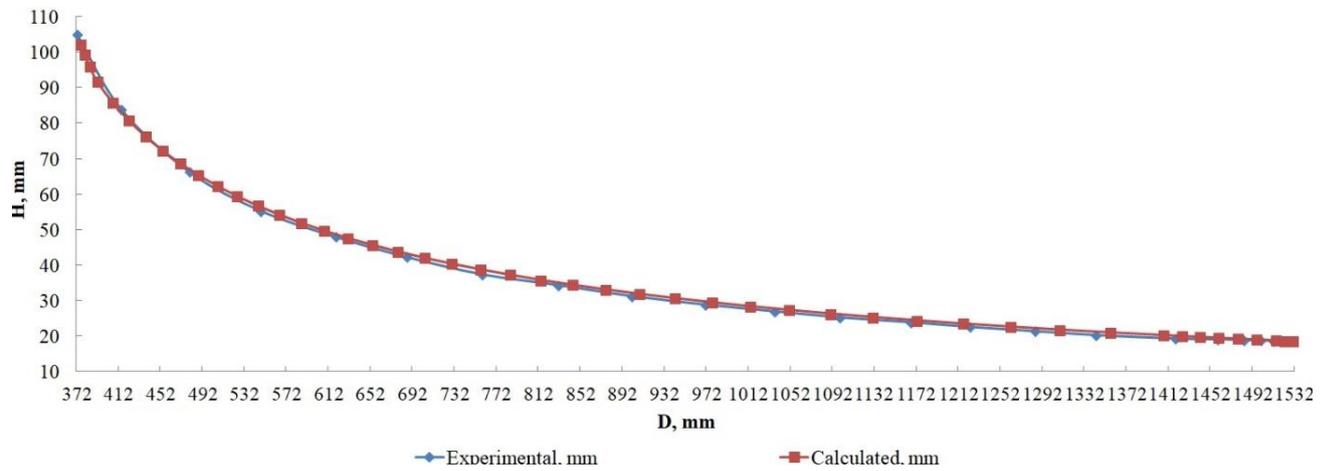


Рисунок 5.5. Зависимость толщины кольца  $H$  от текущего значения наружного диаметра кольца  $D$

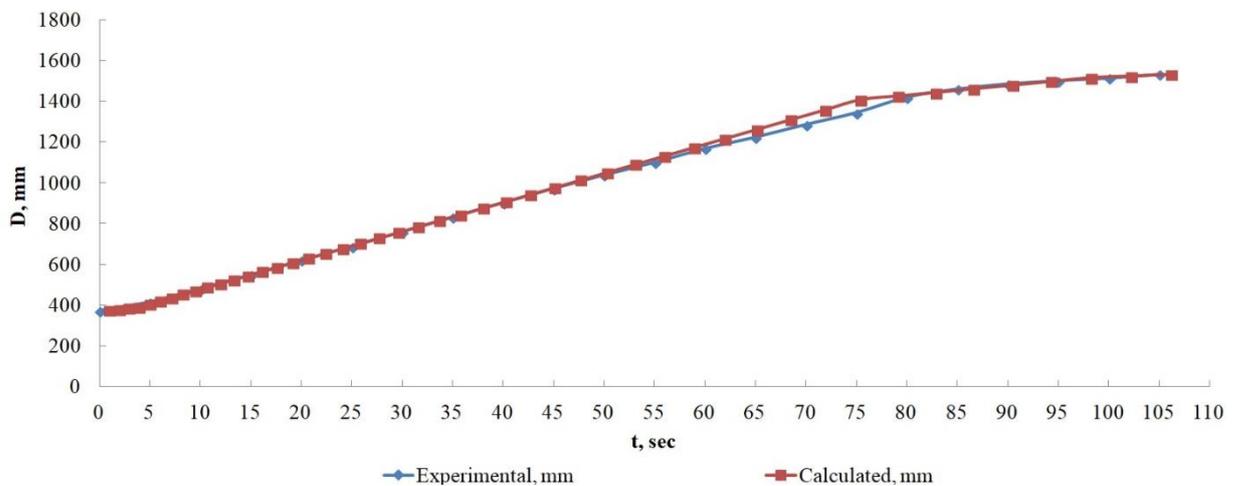


Рисунок 5.6. Зависимость наружного диаметра кольца  $D$  от времени процесса прокатки  $t$

## 5.2 Метод расчета силы и момента в радиальном очаге деформации при прокатке колец

Задача расчета силы прокатки в радиальном очаге деформации металла при прокатке колец возникает каждый раз после расчета на текущем его обороте радиальных и осевых обжатий, размеров кольца, скорости роста его диаметра, скорости движения валка-оправки и других параметров. При этом имеются ввиду суммарные обжатия, которые в радиальном очаге кольцепрокатного стана выполняются главным валком и валком-оправкой.

Для радиального очага деформации (рисунок 5.7) на первом этапе необходимо рассмотреть решение задачи 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. На следующем этапе необходимо рассмотреть основные положения экспериментально-теоретического метода разработки эмпирических формул для коэффициентов напряженного состояния  $n_1$ ,  $n_2$  и выполнить расчет силы прокатки в радиальном очаге деформации.

Из рисунка 5.7 очевидно, что:

$$s_1 + s_2 = H - h. \quad (5.18)$$

По известной формуле определим силы прокатки  $P_1, P_2$  в зоне контакта металла с главным валком и валком-оправкой:

$$P_1 = p_1 \cdot F_1; \quad P_2 = p_2 \cdot F_2; \quad p_1 = n_1 \sigma; \quad p_2 = n_2 \sigma, \quad (5.19)$$

где  $p_1, p_2$  – средние давления в зонах контакта металла с главным валком и валком-оправкой, соответственно;  $F_1, F_2$  – площади вертикальных проекций со-

ответствующих контактных поверхностей;  $n_1, n_2$  – коэффициенты напряженного состояния в зонах контакта металла с главным валком и валком-оправкой, соответственно;  $\sigma$  – напряжение течения металла.

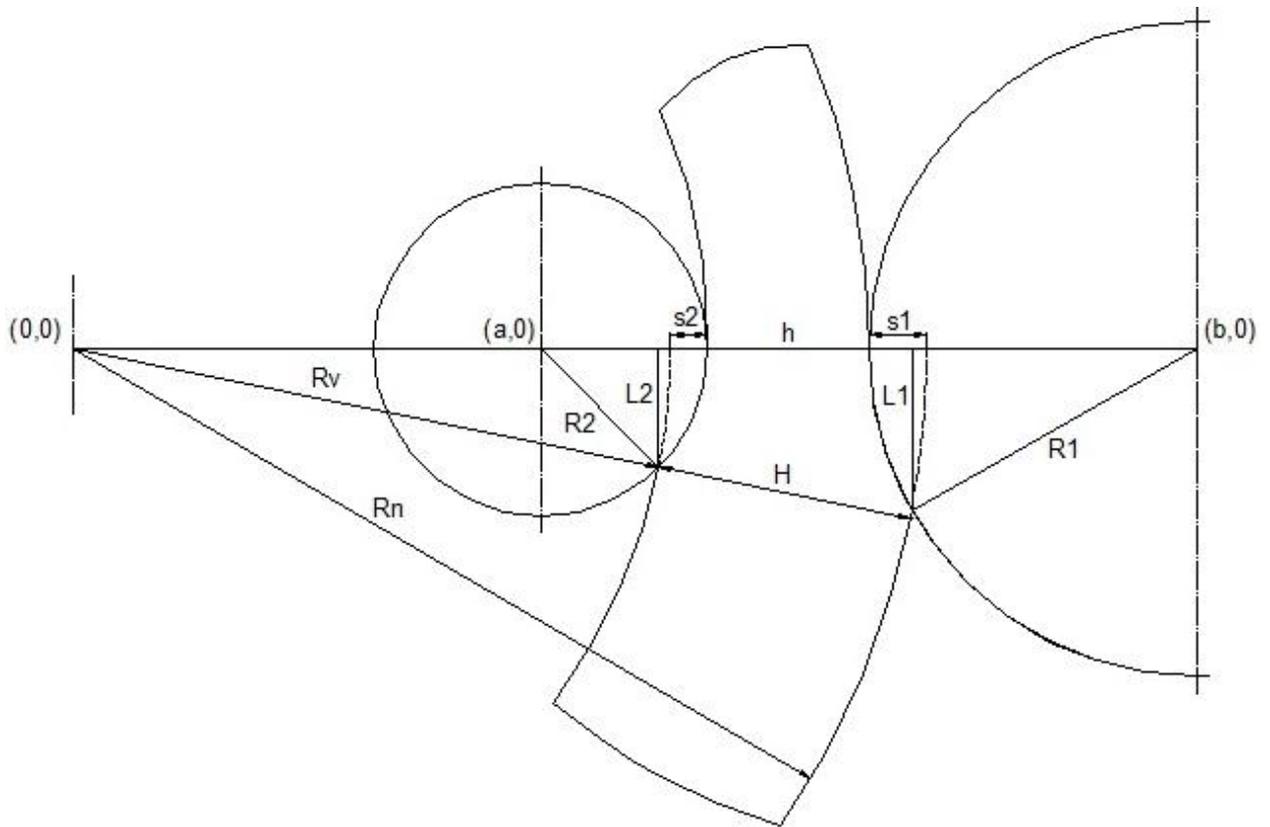


Рисунок 5.7. Очаг деформации при прокатке кольца в вертикальных валках:

$R_1$  – радиус главного приводного валка;  $R_2$  – радиус валка-оправки;  $R_v$  – внутренний радиус кольца;  $R_n$  – наружный радиус кольца;  $H$  – толщина кольца на входе в очаг деформации;  $h$  – толщина кольца на выходе из очага деформации;  $s_1$  – 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

Нами обоснована целесообразность использования для моделирования процессов прокатки колец зависимости для расчета напряжения течения металла

$\sigma(\bar{\varepsilon}, U, T)$ , разработанной на базе теории [108]. Здесь  $\bar{\varepsilon}$  – степень логарифмической деформации,  $U$  – скорость деформации,  $T$  – температура металла:

$$\bar{\varepsilon} = \ln(H/h); U = V[1 - \exp(-\bar{\varepsilon})]/L_r; V = (V_n + V_v)/2, \quad (5.20)$$

где  $L_r$  – средняя длина радиального очага деформации;  $V$  – средняя линейная скорость вращения кольца;  $V_n$  – линейная скорость вращения кольца, соответствующая радиусу  $R_n$ ;  $V_v$  – линейная скорость вращения кольца, соответствующая радиусу  $R_v$ .

Коэффициенты  $n_1, n_2$  будут определены ниже (на базе экспериментальной информации) как эмпирические уравнения, которые зависят от ряда факторов, в том числе и от средней длины  $L_r$  очага деформации.

Очевидно, что сила прокатки в радиальном очаге деформации металла  $P = P_1 = P_2$ . Из этого условия получим коэффициент  $q_r$ , равный отношениям соответствующих величин:

$$q_r = \frac{F_1}{F_2} = \frac{p_2}{p_1}; F_1 = b_{sr} \cdot L_1; F_2 = b_{sr} \cdot L_2; q_r = \frac{L_1}{L_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (5.21)$$

где  $b_{sr}$  – средняя высота кольца в радиальном очаге деформации.

Найдем формулы для определения величин  $L_1$  и  $L_2$ . Затем можем также определить среднюю длину радиального очага деформации:

$$L_r = \frac{L_1 + L_2}{2}. \quad (5.22)$$

Запишем уравнения для окружности радиуса  $R_v$  с центром в точке  $(0;0)$  и окружности радиуса  $R_2$  с центром в точке  $(a;0)$  (рисунок 5.7), где  $a = R_v - R_2 + s_2$ :

$$x^2 + y^2 = R_v^2 ; \quad (5.23)$$

$$(x - a)^2 + y^2 = R_2^2 . \quad (5.24)$$

Координаты точек пересечения этих окружностей получаются путем совместного решения их уравнений. Выполним тождественное преобразование системы двух уравнений (5.23) и (5.24) заменив второе из них разностью этих уравнений:

$$x^2 + y^2 = R_v^2 ; \quad (5.25)$$

$$2x \cdot a - a^2 = R_v^2 - R_2^2 . \quad (5.26)$$

Из уравнения (5.26) находим:

$$x = \frac{R_v^2 - R_2^2 + a^2}{2a} . \quad (5.27)$$

Подставив (5.27) в (5.25) получим:

$$y_{1,2} = \pm \sqrt{R_v^2 - \left( \frac{R_v^2 - R_2^2 + a^2}{2a} \right)^2} . \quad (5.28)$$

В соответствии с рисунком 5.7 выбираем корень  $y_2$ . Учитывая, что  $L_2 = 0 - y_2$ , получим:

$$L_2 = \sqrt{R_v^2 - \left( \frac{R_v^2 - R_2^2 + a^2}{2a} \right)^2}. \quad (5.29)$$

Аналогично, запишем уравнения для окружности радиуса  $R_n$  с центром в точке  $(0;0)$  и окружности радиуса  $R_1$  с центром в точке  $(b;0)$ , где  $b = R_n + R_1 - s_1$ :

$$x^2 + y^2 = R_n^2; \quad (5.30)$$

$$(x - b)^2 + y^2 = R_1^2. \quad (5.31)$$

Выполним тождественное преобразование системы двух уравнений (5.30) и (5.31) заменив второе из них разностью этих уравнений:

$$x^2 + y^2 = R_n^2; \quad (5.32)$$

$$2x \cdot b - b^2 = R_n^2 - R_1^2. \quad (5.33)$$

Из уравнения (5.33) находим:

$$x = \frac{R_n^2 - R_1^2 + b^2}{2b}. \quad (5.34)$$

Подставив (5.34) в (5.30) получим:

$$y_{1,2} = \pm \sqrt{R_n^2 - \left( \frac{R_n^2 - R_1^2 + b^2}{2b} \right)^2}. \quad (5.35)$$

В соответствии с рисунком 5.7 выбираем корень  $y_2$ . Учитывая, что  $L_1 = 0 - y_2$ , получим:

$$L_1 = \sqrt{R_n^2 - \left( \frac{R_n^2 - R_1^2 + b^2}{2b} \right)^2}. \quad (5.36)$$

Найдем формулы для определения величин  $s_1$  и  $s_2$ .

Используя соотношение (5.21) с учетом найденных выражений для  $L_1$  и  $L_2$ , получим:

$$\frac{\sqrt{R_n^2 - \left( \frac{R_n^2 - R_1^2 + b^2}{2b} \right)^2}}{\sqrt{R_v^2 - \left( \frac{R_v^2 - R_2^2 + a^2}{2a} \right)^2}} = q_r. \quad (5.37)$$

Используя уравнение (5.18) представим  $b$  в виде:

$$b = R_n + R_1 - s_1 = R_n + R_1 - H + h + s_2. \quad (5.38)$$

Подставим (5.38) в уравнение (5.37). Из уравнения (5.37) находим  $s_2$ , например, применив метод половинного деления. Затем из уравнения (5.18) находим  $s_1$ . Теперь зная  $s_1$  и  $s_2$ , можно определить величины  $L_1$  и  $L_2$  по формулам (5.36) и (5.29). При этом на первом этапе коэффициент  $q_r$  задается равным, например, единице и выполняются расчеты длин очага деформации  $L_1$  и  $L_2$  по указанному выше методу. Затем на базе соответствующих эмпирических уравнений находятся коэффициенты  $n_1$ ,  $n_2$ , которые в свою очередь зависят от найденного значения  $L_r$ . Используя уравнение (5.21) определяется коэффициент  $q_r$ , как отношение  $n_2/n_1$ . Если коэффициент  $q_r$  действительно равен единице, то расчеты на этом завершаются. Если он получен отличным от единицы, то уже это значение  $q_r$  используется для повторного расчета длин очага деформации  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_r$ .

Итерационный цикл завершается после получения отклонения коэффициента  $q_r$  в двух поочередно выполненных расчетах, которое меньше наперед заданного числа. Соответственно в дальнейшем используются величины  $L_1$  и  $L_2$ , которые найдены на базе коэффициента  $q_r$ , полученного на последнем шаге итерационных расчетов.

Рассмотрим основные положения экспериментально-теоретического метода разработки эмпирических уравнений для расчета коэффициентов напряженного состояния  $n_1, n_2$ .

Коэффициенты  $n_1, n_2$  определим в зависимости от следующих трех факторов:  $x_1$  – степени логарифмической деформации,  $x_2$  – показателя формы очага деформации,  $x_3$  – показателя формы радиального сечения кольца:

$$x_1 = \bar{\varepsilon} = \ln \frac{H}{h}; \quad x_2 = \frac{L_r}{h_{sr}}; \quad x_3 = \frac{b_{sr}}{h_{sr}}; \quad h_{sr} = \frac{(H+h)}{2}; \quad b_{sr} = \frac{(B+b)}{2}. \quad (5.39)$$

Для коэффициентов  $n_1, n_2$  выбран следующий вид эмпирического уравнения:

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_3^2 + a_7 x_1 x_2 + \quad (5.40) \\ + a_8 x_1 x_3 + a_9 x_2 x_3 + a_{10} x_1 x_2 x_3,$$

где  $Y = n_1, n_2$

На базе имеющейся экспериментальной информации [87] по геометрическим параметрам кольца на каждом его обороте и соответствующим значениям сил прокатки в радиальном очаге деформации установлены диапазоны изменения факторов:

$$0 \leq \ln\left(\frac{H}{h}\right) \leq 0,07; \quad 0,20 \leq \frac{L_r}{h_{sr}} \leq 0,55; \quad 2 \leq \frac{b_{sr}}{h_{sr}} \leq 10. \quad (5.41)$$

Предложенный метод предусматривает конечно-элементное моделирование процесса прокатки, для которого имеется указанная выше экспериментальная информация. На следующем этапе выполняется проверка адекватности полученных результатов по отношению ко всей экспериментальной информации. Затем, используя результаты конечно-элементного моделирования, дополнительно определяются значения величин  $L_1$  и  $L_2$  (для соответствующих сочетаний значений факторов).

Массивы коэффициентов  $n_1$ ,  $n_2$  определяются на базе экспериментальной информации по силам прокатки используя формулы, которые следуют из (5.19):

$$n_1 = \frac{P}{\sigma \cdot b_{sr} \cdot L_1}; \quad n_2 = \frac{P}{\sigma \cdot b_{sr} \cdot L_2}. \quad (5.42)$$

Используя массивы коэффициентов  $n_1$ ,  $n_2$  и указанных выше факторов  $\ln(H/h)$ ,  $L_r/h_{sr}$ ,  $b_{sr}/h_{sr}$  на базе метода наименьших квадратов определены константы уравнения (5.40), которые представлены на рисунке А.10.

Графические зависимости коэффициентов  $n_1$  (а),  $n_2$  (б) от факторов  $\ln(H/h)$ ,  $L_r/h_{sr}$ ,  $b_{sr}/h_{sr}$  представлены на рисунке 5.8.

Для эмпирических уравнений (5.40) получены следующие оценки. По коэффициенту  $n_1$ :  $R = 0,99$ , средняя относительная ошибка аппроксимации 2,6 %; по коэффициенту  $n_2$ :  $R = 0,94$ , средняя относительная ошибка аппроксимации 3,2 %.

Расчеты силы прокатки в радиальном очаге деформации выполняется в следующей последовательности. Вначале на базе уравнения (5.37) определяется

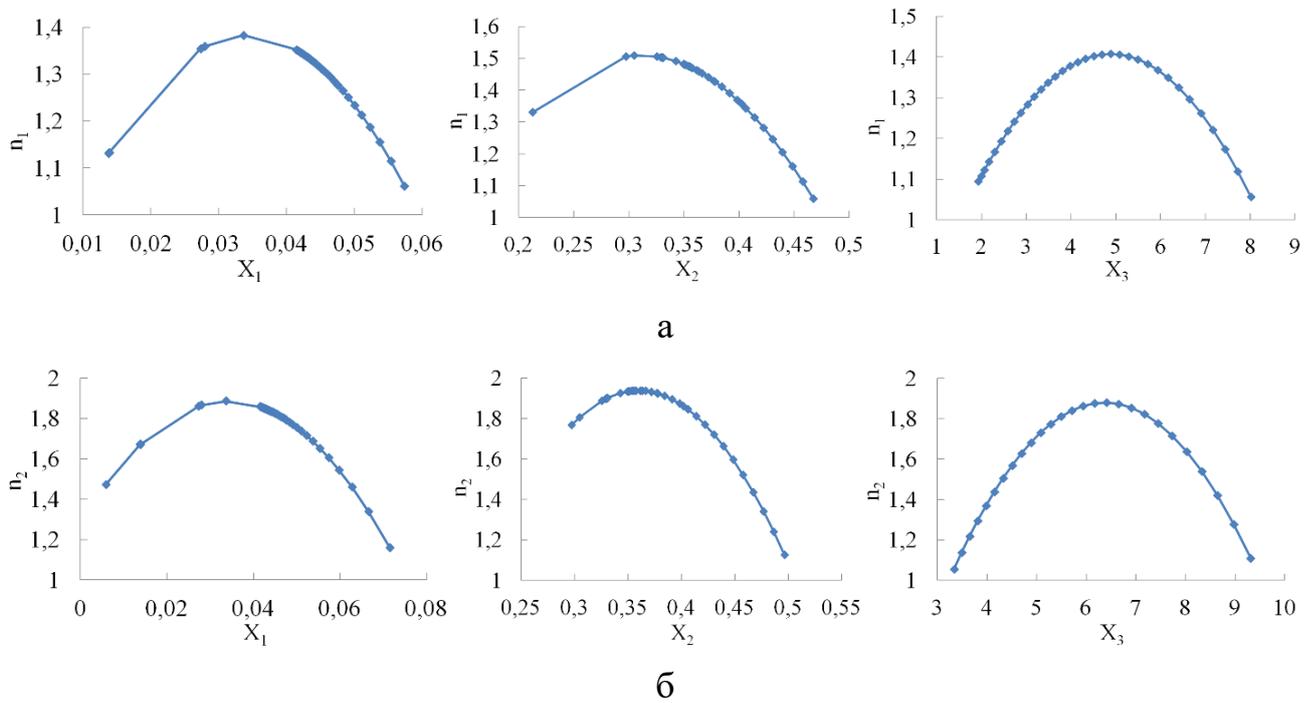


Рисунок 5.8. Зависимости коэффициентов  $n_1$  (а),  $n_2$  (б) от факторов:  $x_1 = \ln(H/h)$ ;

$$x_2 = L_r / h_{sr} \quad x_3 = b_{sr} / h_{sr}$$

обжатие кольца по толщине валком-оправкой ( $s_2$ ). Из уравнения (5.18) находится обжатие кольца по толщине главным валком ( $s_1$ ). Зная  $s_1$  и  $s_2$  по формулам (5.36) и (5.29) определяются значения  $L_1$ ,  $L_2$ , а по формуле (5.22) –  $L_r$ . Затем выполняется расчет значений факторов (5.39). По уравнениям (5.40) с учетом констант (см. рисунок А.10) определяются значения коэффициентов напряженного состояния  $n_1$ ,  $n_2$ . После расчета напряжения течения металла  $\sigma(\bar{\varepsilon}, U, T)$  по известной формуле [109], определяется сила прокатки  $P = P_1 = P_2$  по зависимости (5.19).

На основе разработанной математической модели процесса прокатки и предложенного метода создана компьютерная программа и выполнен расчет сил в радиальном очаге деформации при прокатке кольца, размеры которого указаны в окне на рисунке А.1. Представленная информация (см. Приложение А) позволяет сделать вывод о том, что расчетные значения величин удовлетворяют формулам (5.19), (5.21), (5.42).

На рисунке 5.9 показаны расчетные и экспериментальные [87] графические зависимости силы прокатки кольца в радиальном очаге деформации от текущих значений его наружного диаметра. Среднее относительное отклонение расчетных величин сил прокатки (при указанных на горизонтальной оси значениях наружных диаметров) от экспериментальных не превышает 6,5 %. Аналогичное отклонение на основном этапе прокатки (при изменении наружного диаметра кольца от 390 мм до 1400 мм) не превышает 4,5 %, что позволяет использовать предложенный метод и разработанную компьютерную программу на практике.

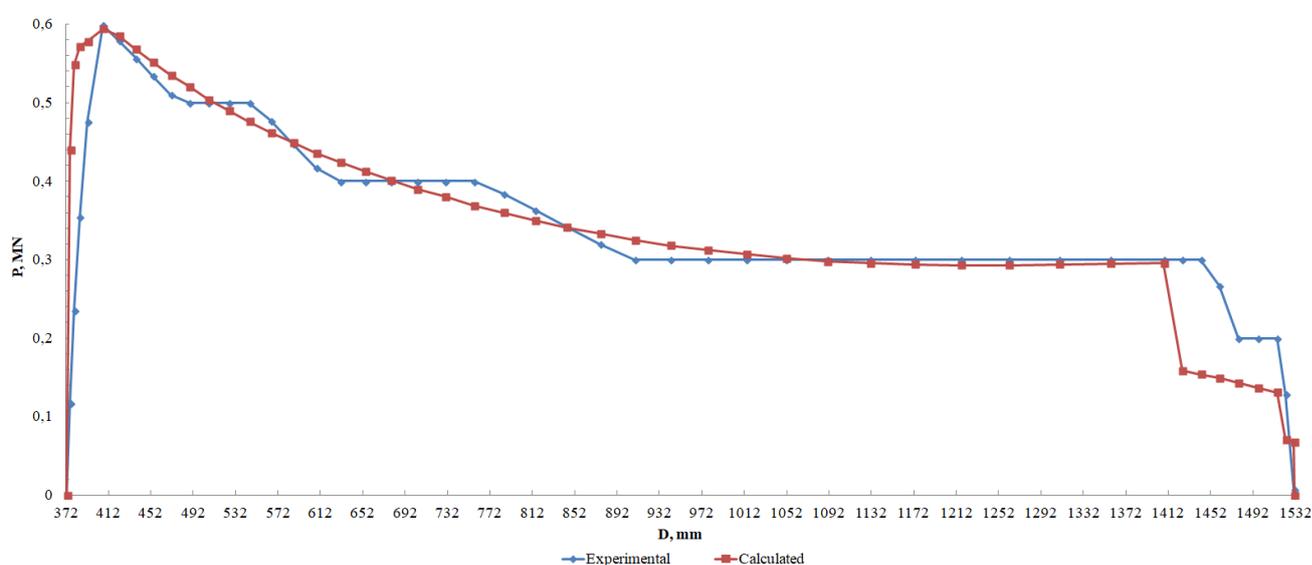


Рисунок 5.9. Зависимость силы прокатки в радиальном очаге деформации  $P$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D$

Предложен также метод расчета момента прокатки. Известно, что без учета потерь на трение в подшипниках равнодействующая сил со стороны металла на неприводной валок-оправку должна проходить через его ось (рисунок 5.10), так как равномерное вращение валка возможно лишь в случае равенства нулю суммы моментов всех сил, действующих на него относительно этой оси [122].

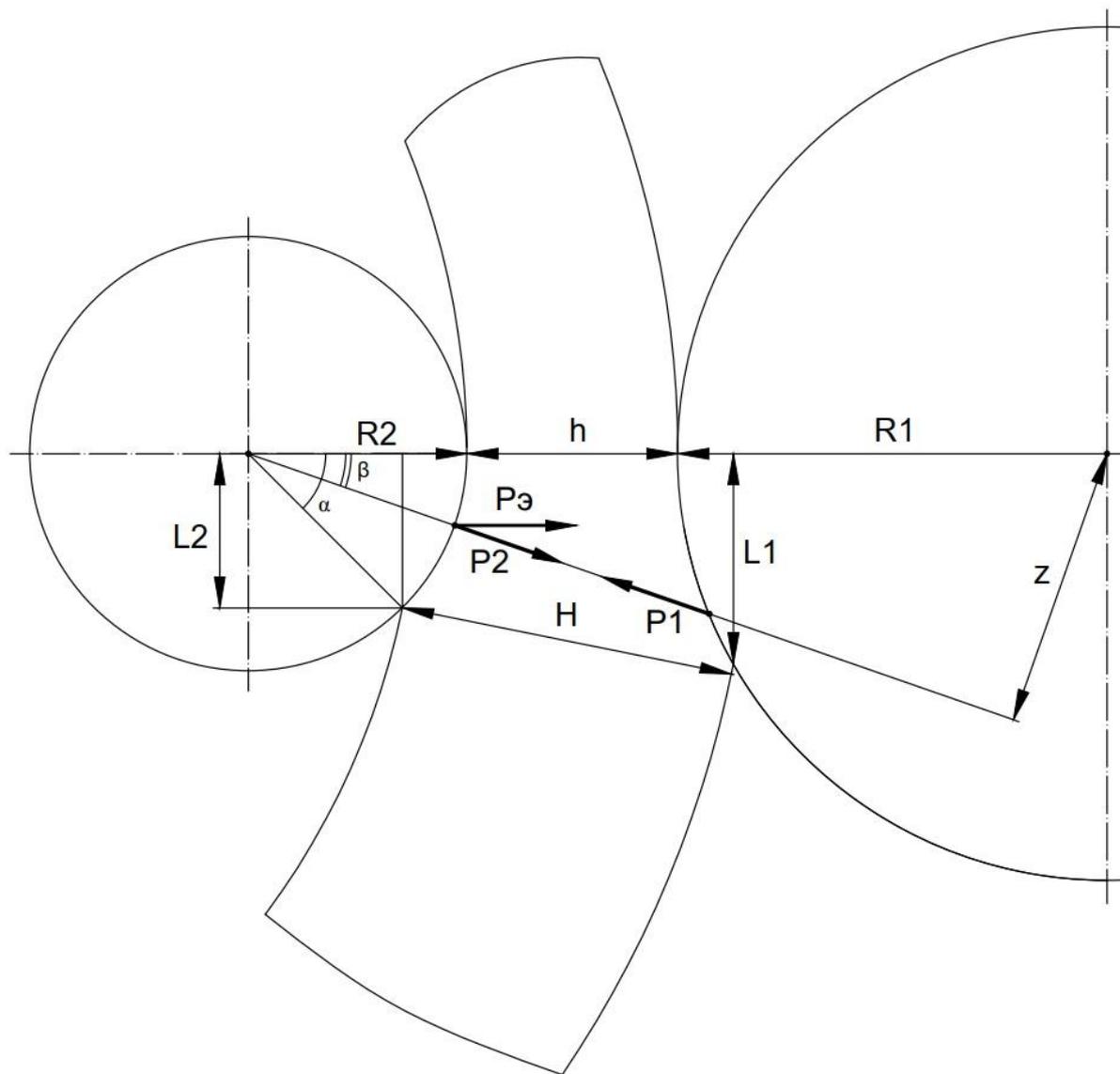


Рисунок 5.10. Радиальный очаг деформации:  $P_1$  – равнодействующая сил стороны металла на валок-оправку;  $P_2$  – равнодействующая сил стороны металла на главный приводной валок;  $P_3$  – горизонтальная проекция силы  $P_1$ , действующая со стороны валка-оправки на металл;  $\beta$  – угол приложения равнодействующей сил  $P_1$ ;  $\alpha$  – угол, характеризующий длину дуги контакта металла с валком-оправкой;  $R_1$  – радиус приводного валка,  $h$  – толщина кольца на выходе из радиального очага деформации;  $H$  – толщина кольца на входе в радиальный очаг деформации;  $R_2$  – радиус валка-оправки;  $z$  – плечо силы;  $L_1$ ,  $L_2$  – проекции дуг контакта металла с главным валком и валком-оправкой, соответственно

Равнодействующие сил  $P_1$  и  $P_2$  равны между собой, но направлены в противоположные стороны [122].

Соответственно, момент прокатки, необходимый для вращения приводного валка, равен:

$$M = P_1 \cdot z, \quad (5.43)$$

где  $z$  – плечо силы (см. рисунок 5.10).

Найдем силу  $P_1$  на базе величины  $P_3$ , которая известна по результатам эксперимента:

$$P_1 = P_3 \cdot \cos \beta, \quad (5.44)$$

Величина плеча силы равна (см. рисунок 5.10):

$$z = G \cdot \sin \beta = (R_1 + h + R_2) \cdot \sin \beta, \quad (5.45)$$

где  $G = R_1 + h + R_2$  – расстояние между осями валков (см. рисунок 5.10)

С учетом формул (5.43) – (5.45) момент прокатки на главном приводном валке равен:

$$M = P_3 \cdot \cos \beta \cdot (R_1 + h + R_2) \cdot \sin \beta = P_3 \cdot (R_1 + h + R_2) \cdot \frac{\sin 2\beta}{2} \quad (5.46)$$

Величину  $\frac{\sin 2\beta}{2}$  обозначим, как  $K_g$  – коэффициент плеча силы прокатки, который найдем на базе экспериментальных данных.

С учетом формул (5.45) и (5.46), коэффициент  $K_g$  (на базе экспериментальной информации по силе прокатки  $P$  и моменту  $M$ ) равен:

$$K_g = \frac{M}{P_g \cdot G}. \quad (5.47)$$

Коэффициент  $K_g$  определим в зависимости от следующих трех факторов:  $x_1$  – степени логарифмической деформации,  $x_2$  – показателя формы очага деформации,  $x_3$  – показателя формы радиального сечения кольца, которые определены формулами (5.39).

Для коэффициента  $K_g$  выбран вид эмпирического уравнения, который аналогичен формуле (5.40) и показан на рисунке А.13.

На базе имеющейся экспериментальной информации [87] по геометрическим параметрам кольца на каждом его обороте и соответствующим значениям сил и моментов прокатки в радиальном очаге деформации установлены диапазоны изменения факторов, определенные (5.41).

Массив коэффициентов  $K_g$  определен на базе экспериментальной информации по формуле (5.47) (см. рисунок А.13). Графические зависимости коэффициента  $K_g$ , от факторов  $\ln(H/h)$ ,  $L_r/h_{sr}$ ,  $b_{sr}/h_{sr}$  представлены на рисунке 5.11. Графическая зависимость коэффициента  $K_g$  от текущих значений наружного диаметра кольца представлена на рисунке А.12.

Для эмпирического уравнения  $K_g$ , представленного в окне программы на рисунке А.13, получены следующие оценки. По коэффициенту  $K_g$ :  $R = 0,99$ , средняя относительная ошибка аппроксимации 4%.

На рисунке 5.12 представлены расчетные и экспериментальные графические зависимости момента прокатки от времени. Средняя относительная ошибка составила 15,7%, на основном этапе прокатки – 6,8%.

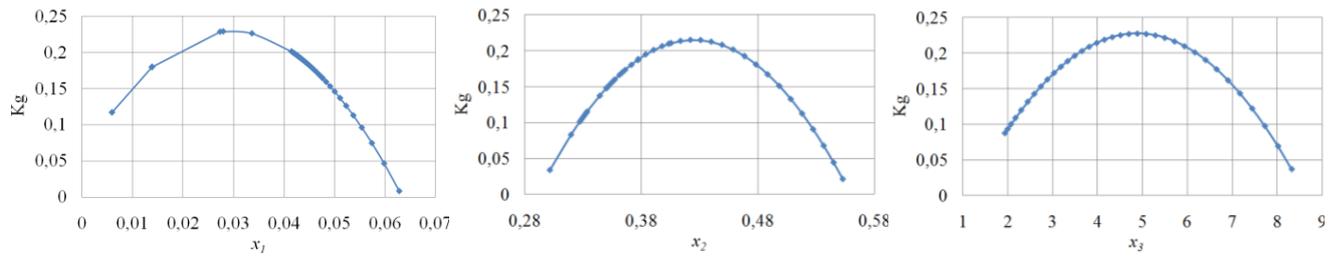


Рисунок 5.11. Зависимость коэффициента  $K_g$  от факторов:  $x_1 = \ln(H/h)$ ;

$$x_2 = L_r / h_{sr} \quad x_3 = b_{sr} / h_{sr}$$

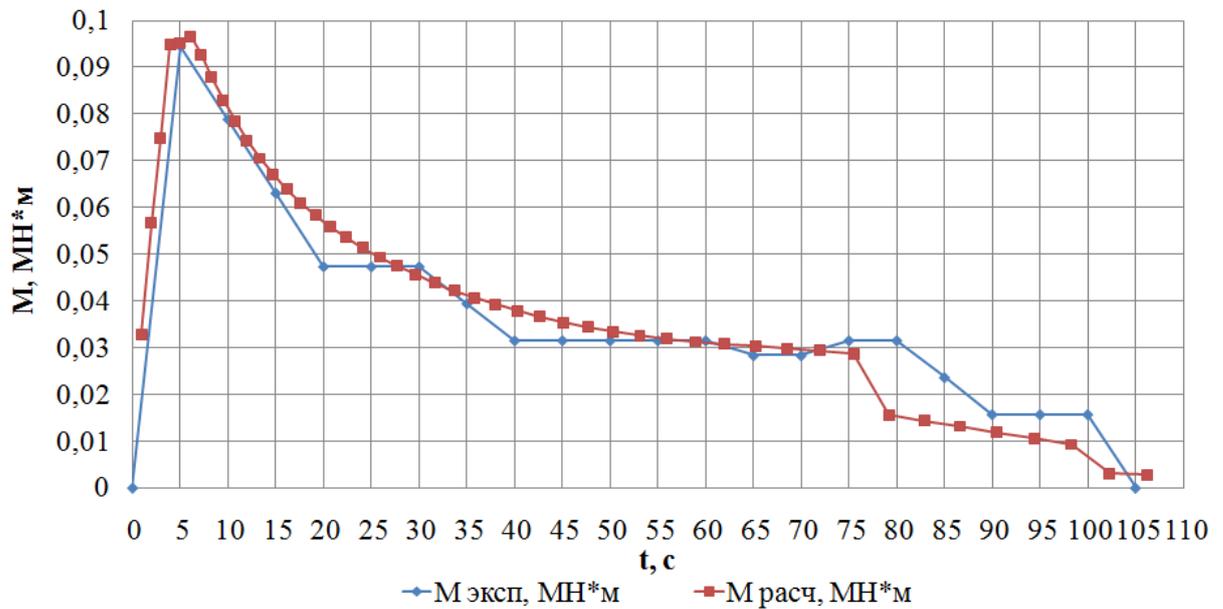


Рисунок 5.12. Зависимость момента прокатки от времени

Мощность прокатки определили по известной формуле (5.48).

$$N = \frac{1,025 \cdot M \cdot w}{0,96}, \quad (5.48)$$

где  $w$  – угловая скорость вращения приводного вала  $w = \frac{V}{R_1}$ ;

$V$  – линейная скорость вращения приводного вала.

Графическая зависимость мощности прокатки от текущих значений наружного диаметра кольца представлена на рисунке А.19.

Напряжения в валке-оправке во определили по известной формуле (5.49).

$$S_g = \frac{P \cdot l}{0,4 \cdot d^3}, \quad (5.49)$$

где  $l$  – длина шейки валка-оправки;

$d$  – диаметр шейки валка-оправки,

Расчеты показали (см. рисунок А.15), что максимальные напряжения в валке-оправке имеют место на границе первого и второго этапов прокатки и не превышают допустимые значения (700 МПа).

### **5.3. Закономерности уширения металла в радиальном и осевом очагах деформации при прокатке колец типа «втулка»**

Применительно к процессу прокатки колец типа «втулка» (рисунок 2.1) эмпирические зависимости для расчета показателей уширения  $K_r$  (в радиальном очаге) и  $K_o$  (в осевом очаге), равных отношению соответствующего уширения к соответствующему обжатию металла, разработаны на базе экспериментальных данных [87] и результатов конечно-элементного моделирования процесса прокатки. Показатели уширения  $K_r$ ,  $K_o$  определены в зависимости от следующих трех факторов:  $x_1$  – степени логарифмической деформации,  $x_2$  – фактора формы очага деформации,  $x_3$  – фактора формы радиального сечения кольца:

– для радиального очага, определенных формулами (5.39).

– для осевого очага:  $x_1 = \ln \frac{B}{b}$ ;  $x_2 = \frac{L_o}{b_s}$ ;  $x_3 = \frac{b_s}{h_s}$ , где  $L_o$  – средняя длина

осевого очага деформации.

Для показателей уширения  $K_r$ ,  $K_o$ , выбран вид эмпирического уравнения, определенный формулой (5.40).

На базе имеющейся экспериментальной информации [87], полученной в промышленных условиях, по геометрическим параметрам кольца в радиальном и осевом очаге деформации установлены следующие диапазоны изменения факторов, определенные диапазонами (5.41).

По результатам конечно-элементного моделирования процесса прокатки, соответствующего эксперименту [87], определены значения показателей  $K_r$  и  $K_o$ . Используя массивы  $K_r$ ,  $K_o$  и указанных выше факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , на базе метода наименьших квадратов определены константы уравнения (5.40), которые представлены в таблице 5.1.

Графические зависимости показателей уширения  $K_r$ ,  $K_o$  от факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , полученные на базе эмпирических формул (5.40), представлены на рисунке 5.13. Расчеты в зависимости от каждого из факторов выполнялись при средних значениях двух других факторов, соответствующих диапазонам их изменения (5.41).

Таблица 5.1. Константы уравнений (1) для расчета величин:  $K_r$ ,  $K_o$

Показатель Константы	$K_r$	$K_o$
$a_0$	8,437235	1,903373
$a_1$	63,763959	-761,924287
$a_2$	-63,576746	-19,950739
$a_3$	-0,388794	-0,290923
$a_4$	628,682611	-39820,738148
$a_5$	129,927063	699,557356
$a_6$	0,025661	0,010495
$a_7$	-369,505126	6544,528609
$a_8$	47,830469	-51,521257
$a_9$	-0,291804	3,547700
$a_{10}$	-110,576619	1016,696570

Для эмпирических уравнений получены следующие оценки.

По показателю уширения в радиальном очаге  $K_r$ :  $R = 0,98$ , средняя относительная ошибка аппроксимации 11,9 %.

По показателю уширения в осевом очаге  $K_o$ :  $R = 0,99$ , средняя относительная ошибка аппроксимации 0,6 %.

С учетом уширения металла в радиальном и осевом очагах деформации при прокатке кольца типа «втулка» для условий, соответствующих экспериментальным данным [87], построены графические зависимости, показанные на рисунке 5.14.

Как видно из рисунка 5.14, по мере роста диаметра кольца и снижения величины частных радиальных обжатий (см. рисунок 5.15), показатель уширения в осевом очаге деформации ( $K_o$ ) начиная с времени  $t \sim 5$  с постепенно уменьшается по ходу процесса прокатки. Наряду с этим, в радиальном очаге деформации показатель уширения ( $K_r$ ) изменяется более сложно.

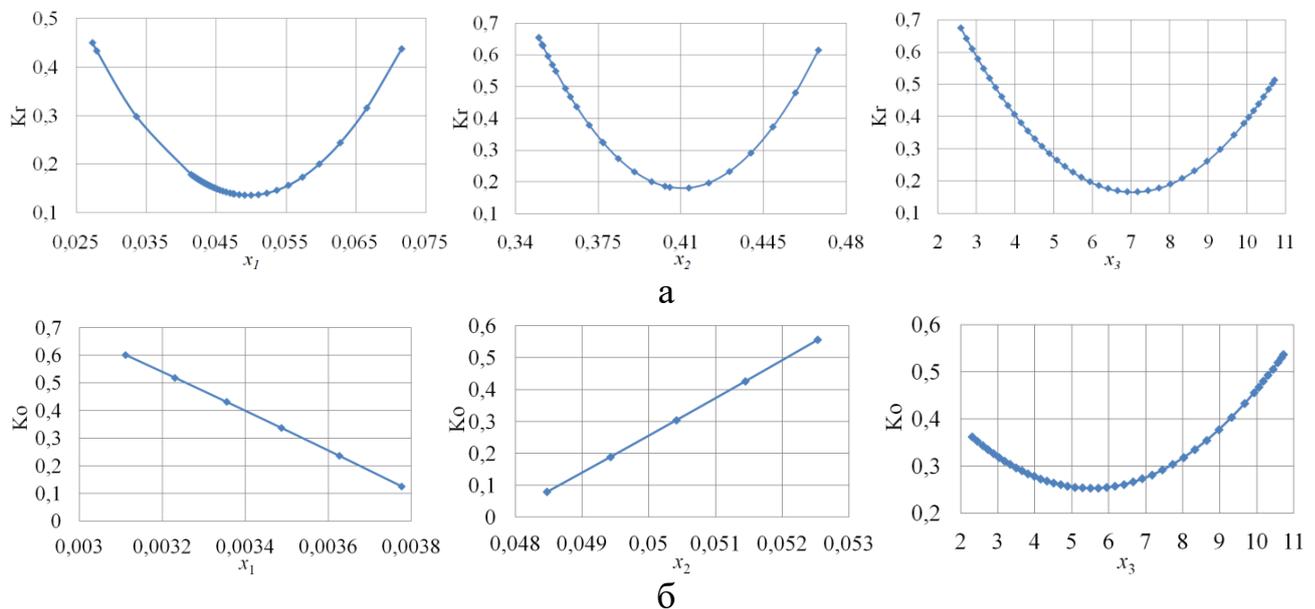
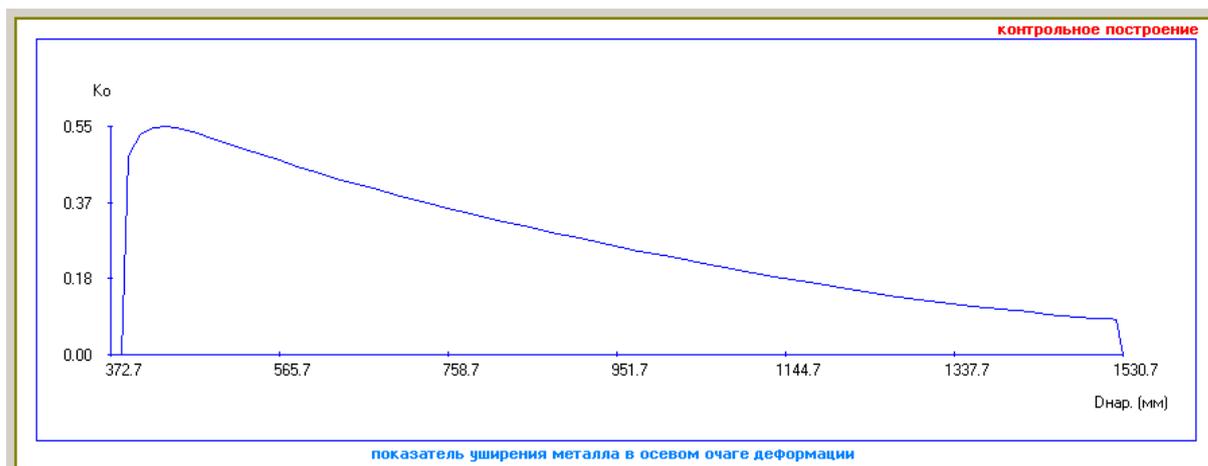
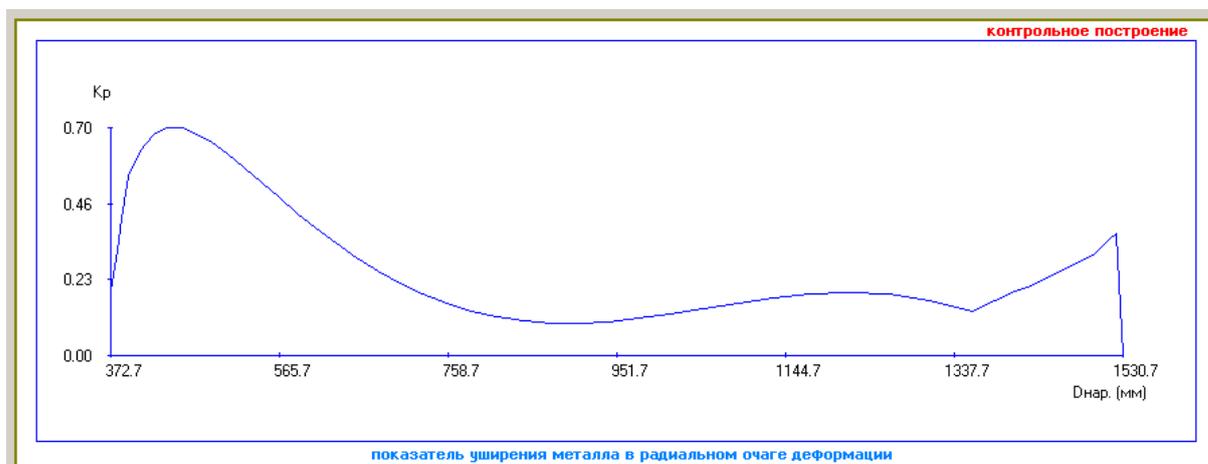


Рисунок 5.13. Зависимости показателей уширения  $K_r$  (а) и  $K_o$  (б) от факторов  $x_1, x_2, x_3$

На первом этапе прокатки ( $0 < t < 5$  с) увеличению частных радиальных обжатий (фактор  $x_1$ ) соответствует увеличение показателя  $K_r$ .



а



б

Рисунок 5.14. Окно программы контрольного построения графических зависимостей показателей уширения  $K_r$  (а) и  $K_o$  (б) от текущего значения наружного диаметра кольца (расчеты выполнены для условий прокатки, соответствующих экспериментальным данным [87]) (средние значения показателей уширения  $K_r$  и  $K_o$  составили 0,31)

Второй основной этап прокатки соответствует скорости роста диаметра кольца 14,2 мм/с и завершается при  $t = 75,5$  с ( $D_{нар} = 1408$  мм). До времени  $t \sim 50$  с ( $D_{нар} = 950$  мм) снижению величин частных радиальных обжатий (фактор  $x_1$ ) соответствует снижение показателя  $K_r$ . При  $t > 50$  с ( $D_{нар} > 950$  мм), несмотря на снижение вышеуказанных обжатий, наблюдается устойчивая тенденция к росту  $K_r$  вплоть до окончания процесса прокатки (рисунок 5.14а). Это объясняется тем,

что ко времени  $t \sim 50$  с реализовано более 80% суммарного радиального обжатия, в результате чего на величину  $K_r$  более существенное влияние оказывает фактор формы очага деформации  $x_2$ , а влияние обжатия (фактора  $x_1$ ) практически отсутствует (рисунок 5.13 а).

На этапе перехода от второго этапа прокатки к третьему ( $t \sim 75,5$  с,  $D_{нар} = 1408$  мм) имеет место локальное снижение показателя  $K_r$ , связанное с изменением режима работы стана, при котором скорость роста наружного диаметра кольца резко снижается с 14,2 до 4,7 мм/с.

На четвертом заключительном этапе прокатки, начиная с времени  $t \sim 102$  с ( $D_{нар} = 1523$  мм) скорость роста наружного диаметра кольца уменьшается незначительно (до 2 мм/с). Соответственно, и характер зависимости показателя уширения ( $K_r$ ) практически не меняется.

На рисунке 5.15, 5.16 представлены расчетные и экспериментальные кривые для обжатия металла в радиальном очаге деформации и толщины кольца, которые определены с учетом уширения металла, в зависимости от времени.

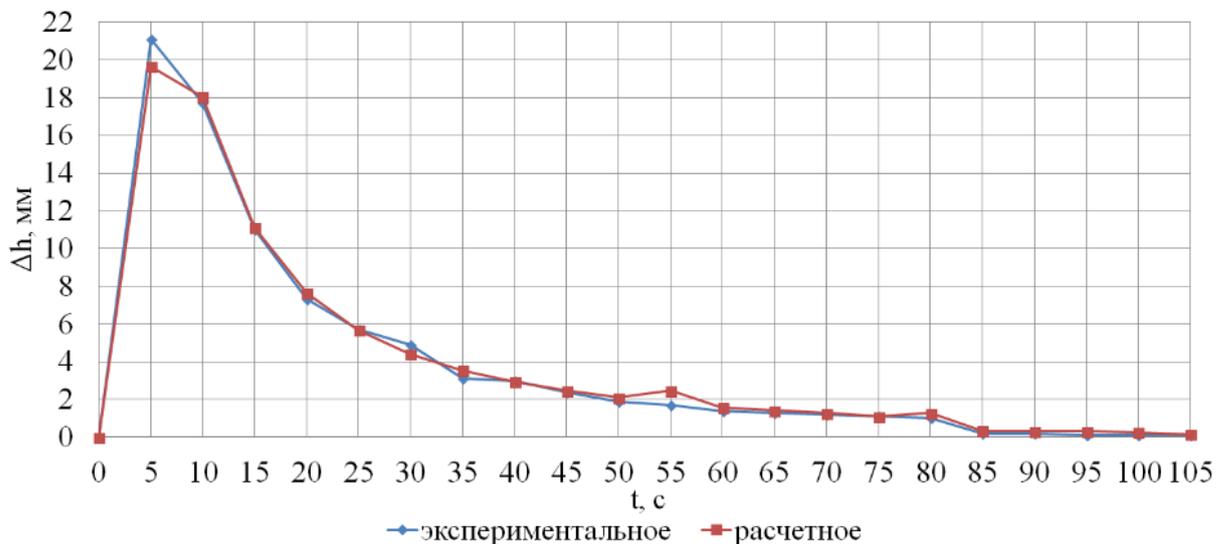


Рисунок. 5.15. Зависимость обжатия металла  $\Delta h$  в радиальном очаге деформации от времени  $t$

Качественный ход расчетных кривых соответствует экспериментальным. Средние отклонения расчетных величин от экспериментальных на основном этапе прокатки кольца ( $5 \text{ с} \leq t \leq 75,5 \text{ с}$ ) по текущей толщине кольца не превышают 1,6 %, по текущему обжатию – 8,4 %.

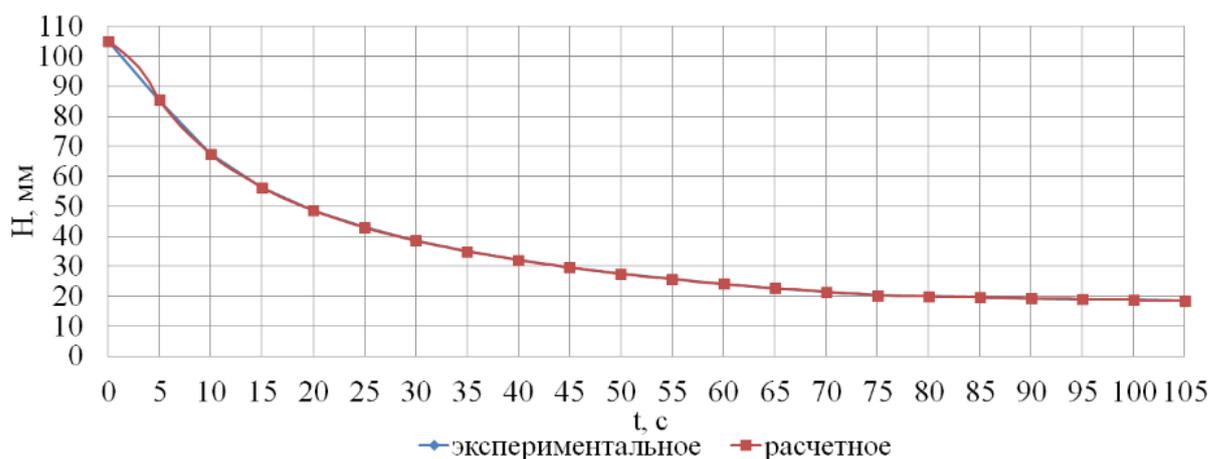


Рисунок 5.16. Зависимость толщины кольца  $H$  от времени  $t$

## Выводы

1. 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 12,2 %), по силе прокатки – 6,5 % (на основном этапе прокатки 4,5 %), по моменту прокатки – 15,7% (на основном этапе

прокатки 6,8 %), что позволяет использовать компьютерную программу на практике для совершенствования технологии прокатки колец.

2. Разработаны эмпирические уравнения для расчета показателей уширения металла в радиальном и осевом 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.

Материалы настоящего раздела опубликованы в работах [123, 124, 125].

## РАЗДЕЛ 6

### РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ И ПРОКАТКИ КОЛЕЦ С НАРУЖНЫМ ГРЕБНЕМ

#### **6.1. Технологическая схема осадки, штамповки и прокатки главного валка колесопрокатного стана**

Главный валок колесопрокатного стана является ответственным инструментом деформации, который формирует поверхность катания обода железнодорожного колеса при его прокатке. Соответствующий профиль валка, по сути, является фланцем с наружным гребнем, который также может быть изготовлен на базе процессов штамповки и прокатки. Предприятию, специализирующемуся на выпуске кольцевых изделий, рационально организовать производство таких валков на прессопрокатной линии кольцепрокатного стана. Контур такого фланца будет максимально приближен к контуру механически обработанного главного валка колесопрокатного стана.

Проектирование на базе специализированной компьютерной программы чистового технологического фланца выполнено в окне, представленном на рисунке 3.5, а чернового фланца – на рисунке 3.7. Проектирование в автоматизированном режиме калибровки для штамповки заготовки с наружным гребнем на заготовочном прессе выполнено в окне программы, представленном на рисунке 3.9. Совмещение контуров: чистового механически обработанного главного валка колесопрокатного стана; прокатанного на стане чернового фланца (калибровка по металлу для КПС); кольцевой заготовки с гребнем (калибровка по металлу для заготовочного прессы) показано на рисунке 3.10.

На этой основе предложена технологическая схема осадки, штамповки и прокатки фланца с наружным гребнем (главного валка колесопрокатного стана), показанная на рисунке 6.1.

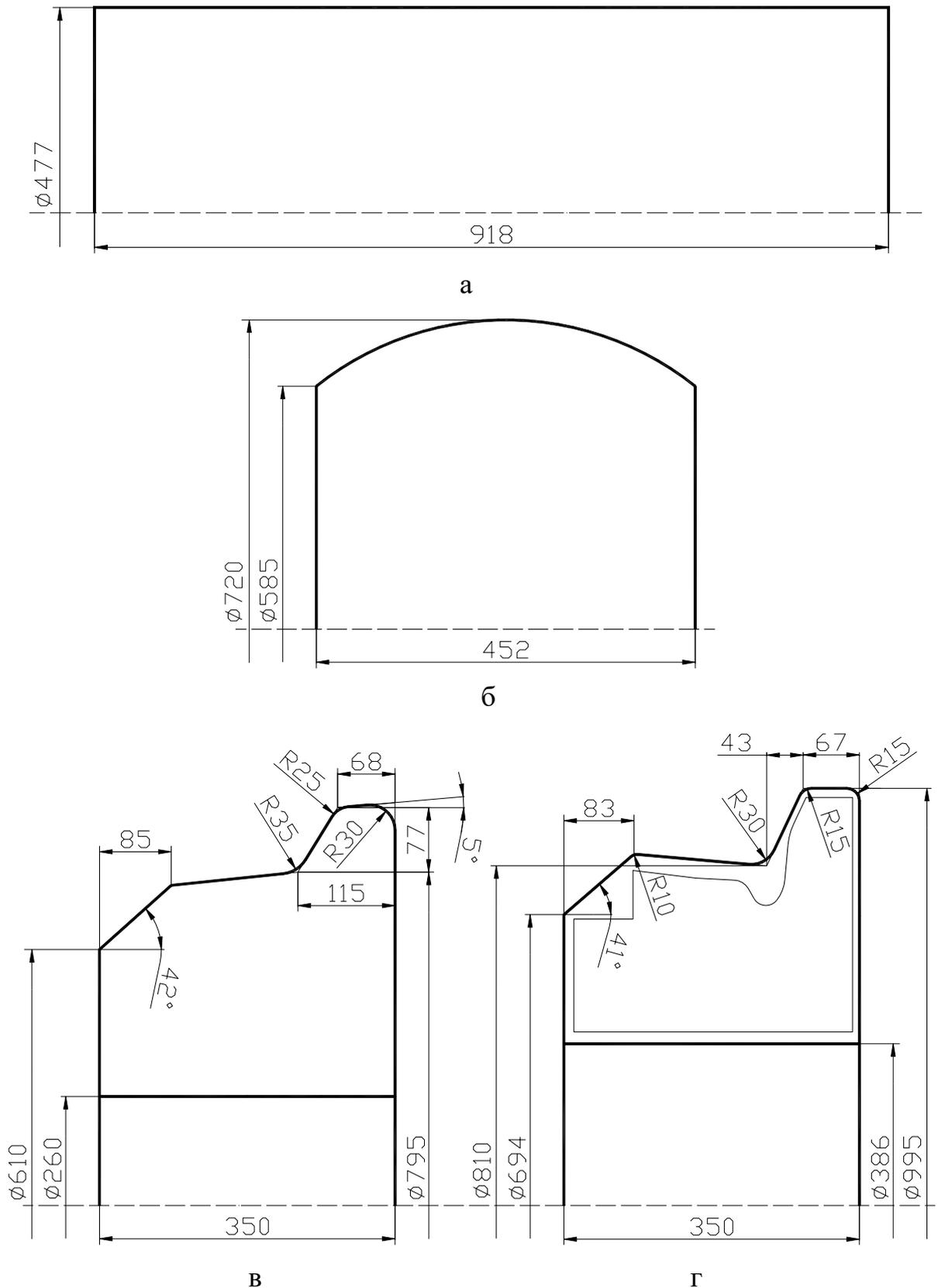


Рисунок 6.1. Технологическая схема осадки, штамповки и прокатки фланца с наружным гребнем (главного вала колесопркатного стана), показаны контуры: а – исходной заготовки; заготовок: б – после осадочного пресса; в – после заготовочного пресса; г – фланца после кольцепрокатного стана

## **6.2. Разработка режимов деформации металла для штамповки кольцевой заготовки с гребнем и прокатки главного валка колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане**

### **6.2.1. Конечно-элементное моделирование процесса осадки, штамповки и разгонки кольцевой заготовки с гребнем, разработка режима деформации металла**

Для кольцевой заготовки использована пластическая модель материала. В качестве материала принята конструкционная углеродистая качественная сталь 60, для которой параметры, характеризующие теплофизические свойства, взяты из базы данных DEFORM 3D.

Нагретая до температуры горячей деформации заготовка после гидросбива окалины с ее торцевых поверхностей передается на пресс силой 20 МН для предварительной свободной осадки гладкими плитами (рисунок 6.2).

Высота исходной заготовки 918 мм, диаметр 477 мм. Степень высотной деформации принята 466 мм (48%). Соответственно высота осаженой заготовки равна 452 мм. При этом расчетная сила при свободной осадке составила 13 МН (рисунок 6.3), что объясняется тем, что основная пластическая деформация происходит в средней по высоте части заготовки.

После осадки заготовка взвешивается в потоке прессопрокатной линии.

Затем она транспортируется по рольгангу к заготовочному прессу двойного действия силой 40/20 МН, где она центрируется на нижней плите прессы механическим центрователем (рисунок 6.4).

Затем выполняется штамповка в закрытом штампе (рисунок 6.5) и, без снижения давления в цилиндрах рабочего хода траверсы, независимым ходом пуансона выполняется разгонка центральной части заготовки (рисунок 6.6).

Этим обеспечивается заполнение штампа в зоне гребня заготовки, а также требуемая высота выдавки, достаточная для реализации дальнейшей прошивки заготовки на прессе силой 8 МН.

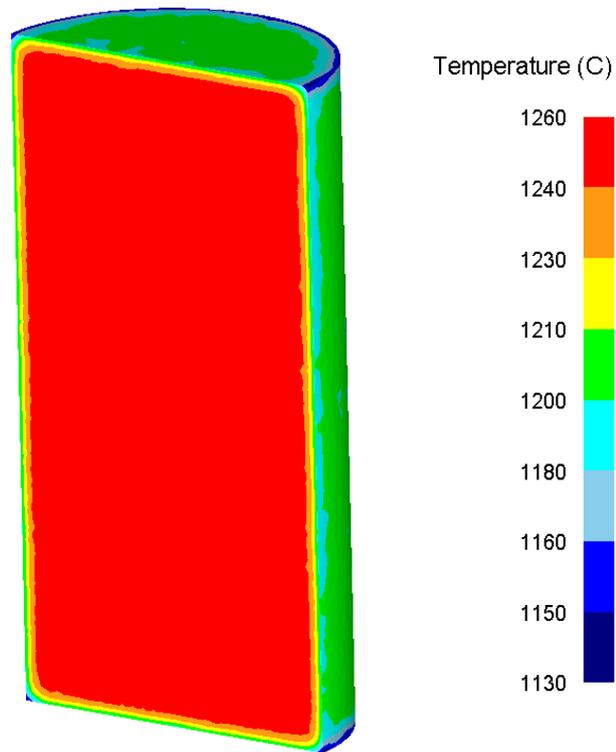


Рисунок 6.2. Температурное поле заготовки после ее транспортировки от печи к прессу силой 20 МН (начальный момент осадки)

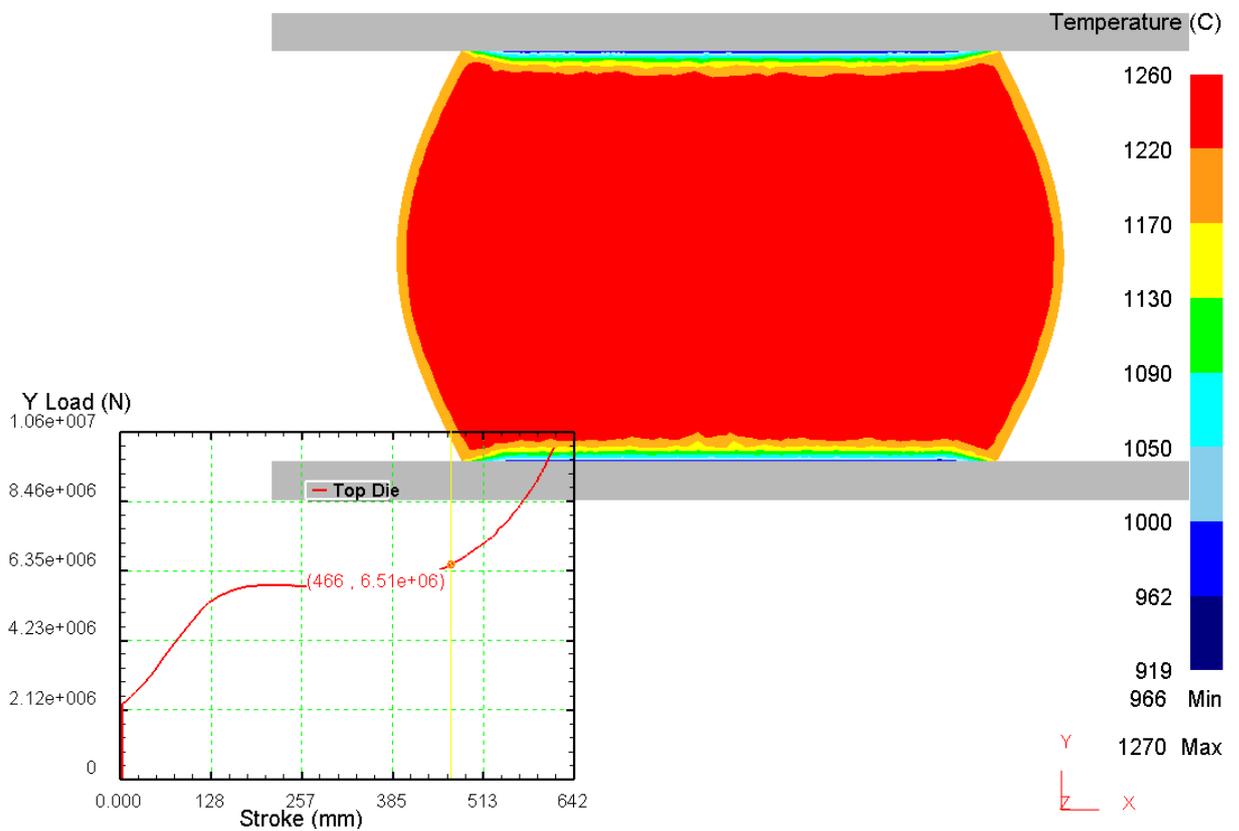


Рисунок 6.3. Последний момент осадки заготовки на прессе силой 20 МН

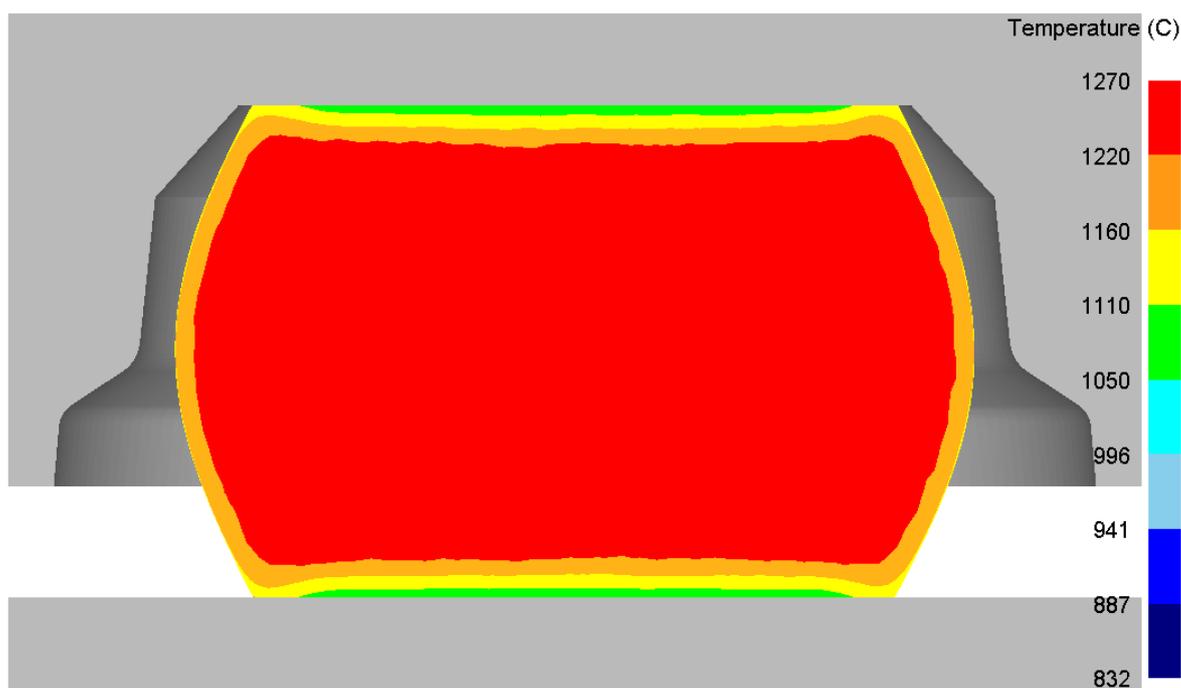


Рисунок 6.4. Температурное поле заготовки после ее транспортировки прессу силой 40/20 МН (в начальный момент штамповки)

Как показали результаты моделирования, расчетная величина разгонки обеспечивает требуемое заполнение углов штампа, а сила разгонки, равная 15,2 МН, не превышает допустимую величину (рисунок 6.6).

Величина рабочего хода верхней траверсы пресса 40/20 МН составила 102 мм. То есть, степень высотной деформации получена равной 22%.

Принятое распределение суммарной деформации заготовки по высоте между прессами 20 МН и 40/20 МН способствует выравниванию циклов на данных прессах. Снижение цикла актуально для пресса 40/20 МН, перед которым производят взвешивание заготовки (для определения величины рабочего хода пуансона), и который является прессом двойного действия.

Так, с учетом принятых скоростей рабочего хода инструмента деформации на прессах, получили расчетное время деформирования заготовок: при свободной осадке (пресс 20 МН) 15 – 16 с, а при штамповке с разгонкой (пресс 40/20 МН) 13 – 14 с.

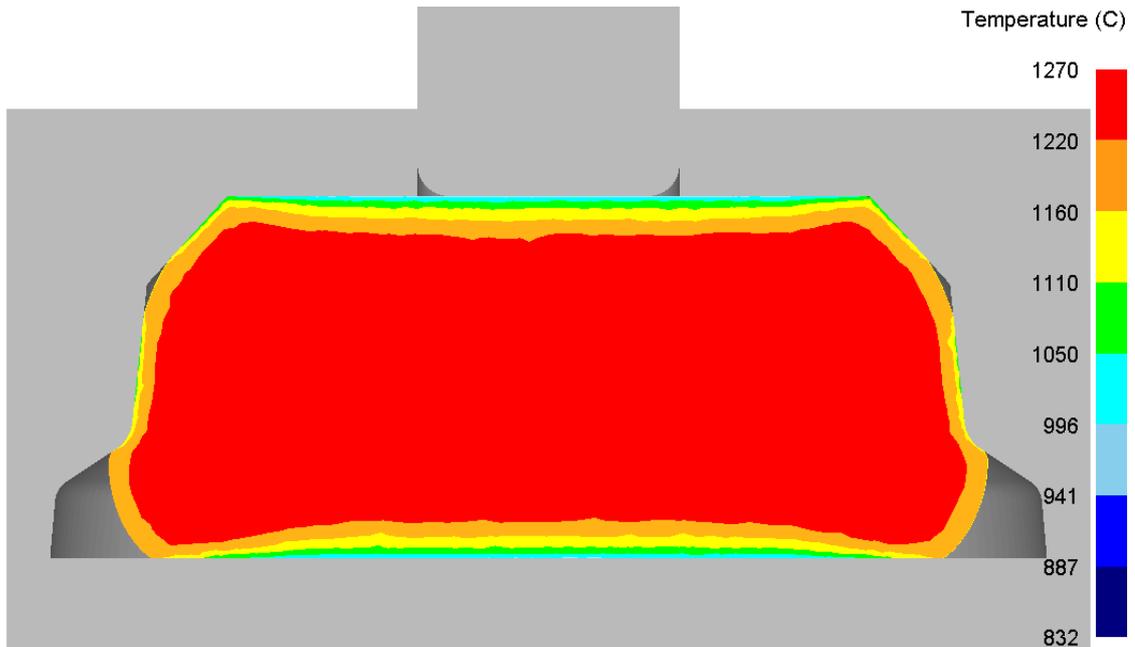


Рисунок 6.5. Последний момент штамповки заготовки на прессе силой 40/20 МН  
(начальный момент разгонки)

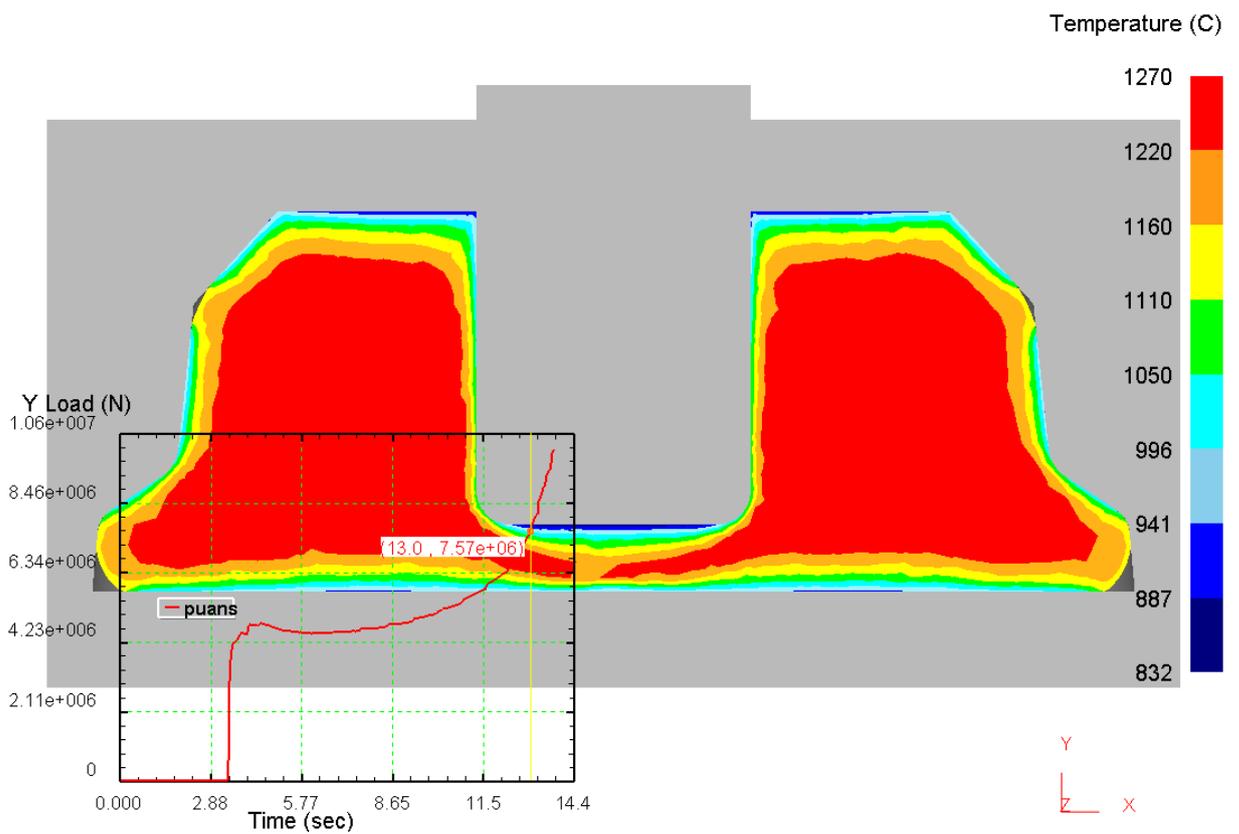


Рисунок 6.6. Последний момент разгонки заготовки на прессе силой 40/20 МН

## 6.2.2. Предварительный расчет режима обжатий металла на базе аналитической модели

Предварительный расчет режима обжатий металла при прокатке валка колесопрокатного стана выполнен на базе соответствующего приведенного прямоугольного сечения с использованием аналитической модели, разработанной в разделе 5, и созданной на ее основе компьютерной программы. Окна программы представлены в приложениях А и Б. Результаты предварительного расчета, которые на следующем этапе использовали для выполнения уточненных конечно-элементных расчетов (см. пункт 6.2.3), показаны в приложении Б.

В приложении А на базе аналитической модели и компьютерной программы выполнено моделирование процесса прокатки кольца, для которого имелась экспериментальная информация по геометрическим и энергосиловым параметрам [87]. Это позволило разработать эмпирические формулы для расчета коэффициентов напряженного состояния  $n_1$ ,  $n_2$  и коэффициента плеча силы прокатки  $K_g$ . Эти формулы использовали при выполнении предварительных расчетов режима обжатий металла при прокатке валка колесопрокатного стана по соответствующему приведенному прямоугольному сечению (рисунки 6.7 – 6.10).

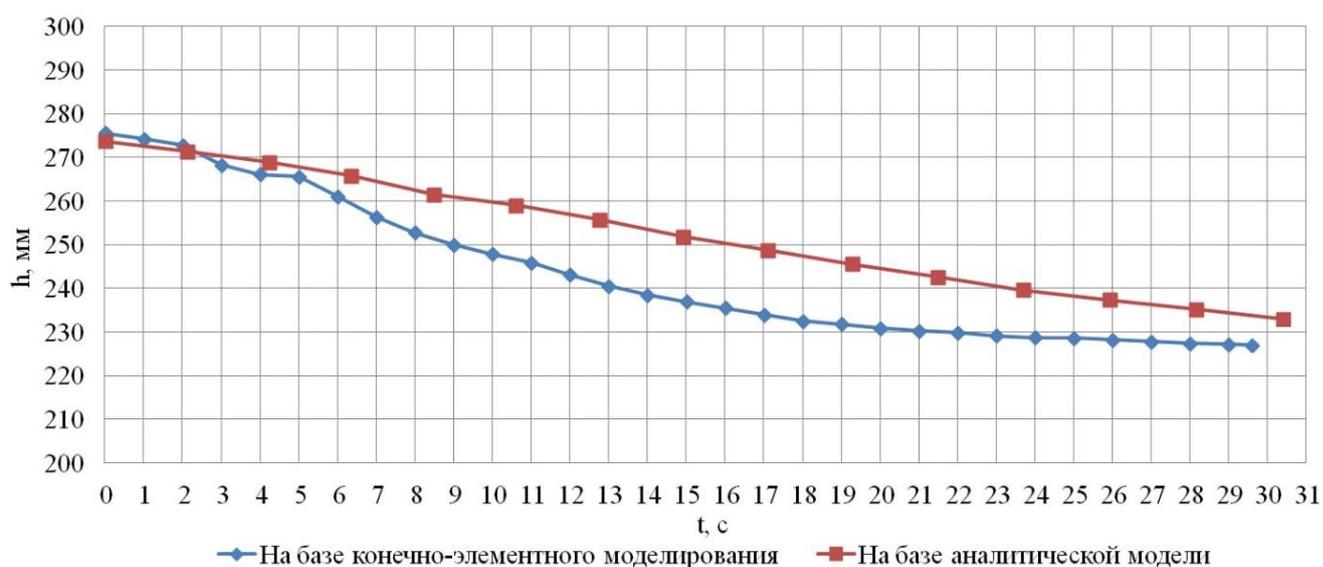


Рисунок 6.7. Зависимость толщины кольца от времени

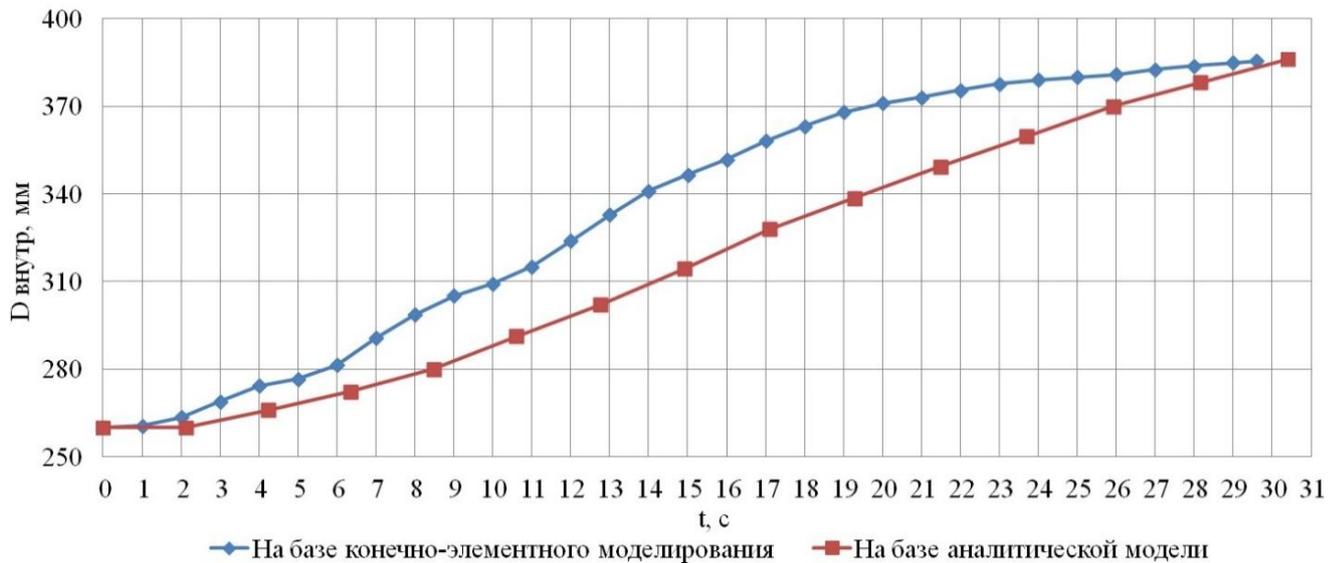


Рисунок 6.8. Зависимость внутреннего диаметра кольца от времени

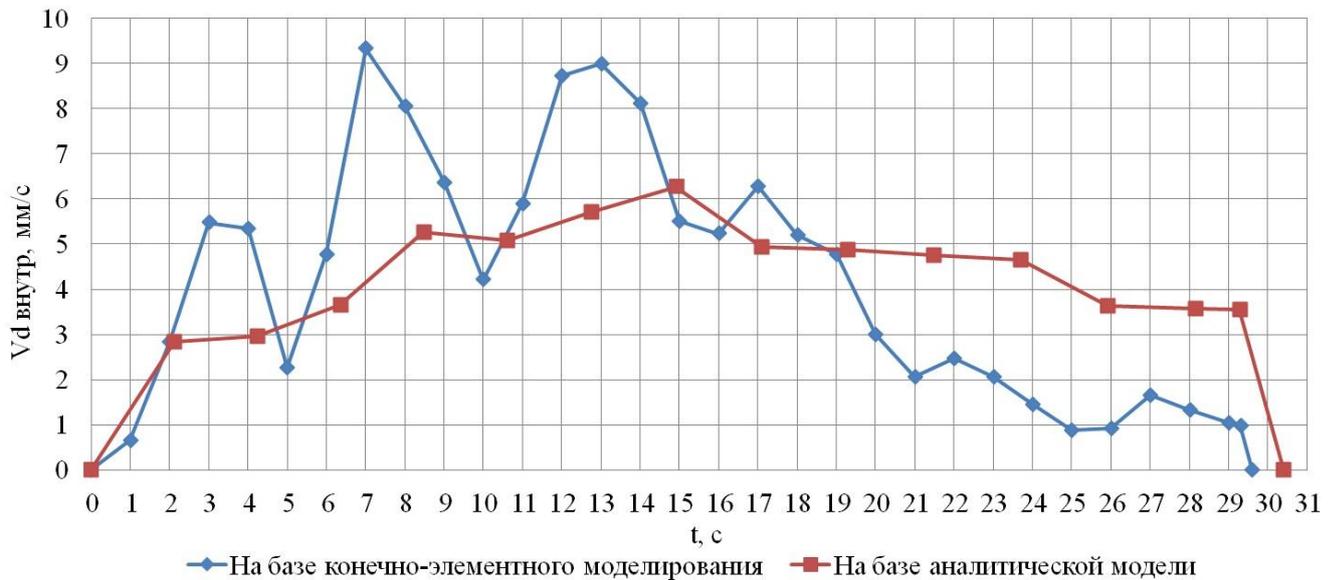


Рисунок 6.9. Зависимость скорости роста внутреннего диаметра кольца от времени

Результаты предварительного моделирования на базе аналитической модели процесса прокатки кольца зависимостей толщины, внутреннего диаметра кольца и скорости роста внутреннего диаметра кольца от времени, а также зависимости силы прокатки от внутреннего диаметра кольца представлены на рисунках 6.7 – 6.10 (кривые показаны красным цветом). По существу эти зависимости использовали для получения результатов уточненного конечно-

элементного моделирования процесса прокатки фланца (валка колесопрокатного стана). Для сравнения уточненные конечно-элементные результаты на этих рисунках также показаны (синим цветом).

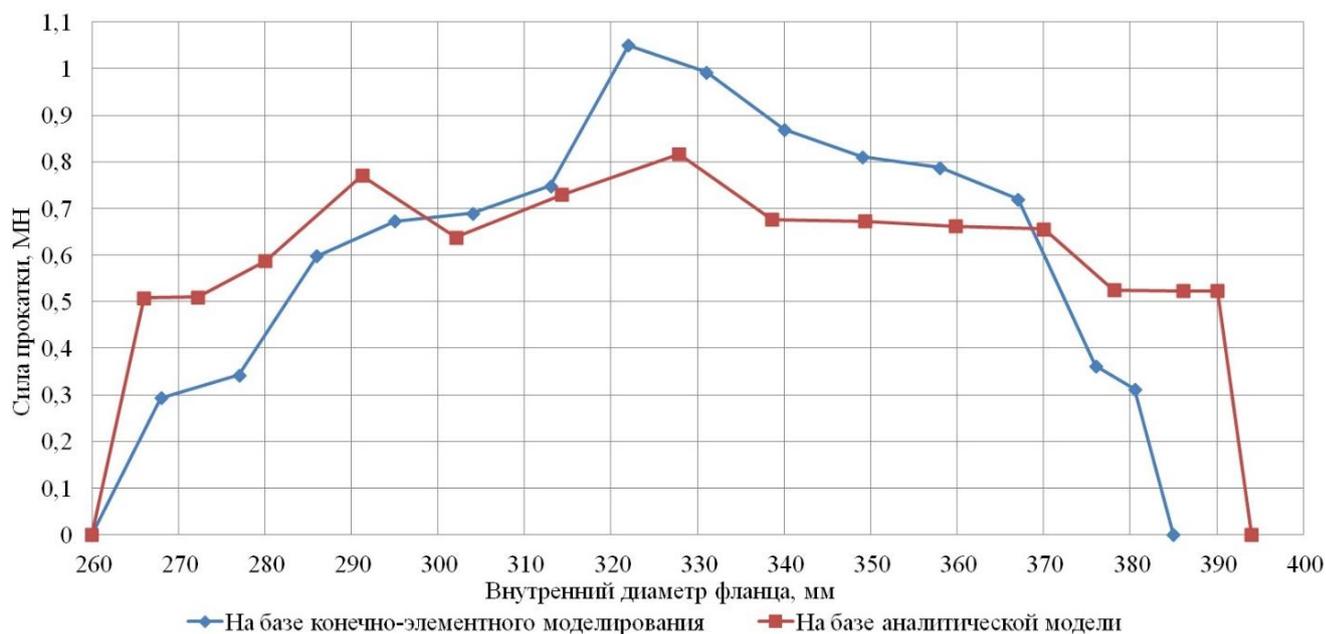


Рисунок 6.10. Зависимость силы прокатки от внутреннего диаметра кольца

### 6.2.3. Конечно-элементное моделирование процесса прокатки валка, разработка режима деформации металла

Конечно-элементное моделирование процесса прокатки выполнено для разработки на этой основе рациональных режимов деформации металла при производстве штампованно-катаных фланцев, необходимых для изготовления главных валков колесопрокатных стана.

Процесс прокатки кольцевых заготовок на кольцепрокатном стане реализован в программной среде DEFORM 3D. Построение модели осуществляли в шаблоне Ring Rolling. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец выполнена в подразделе 2.1.

Визуализация моделирования процесса прокатки фланца представлена на рисунке 6.11.

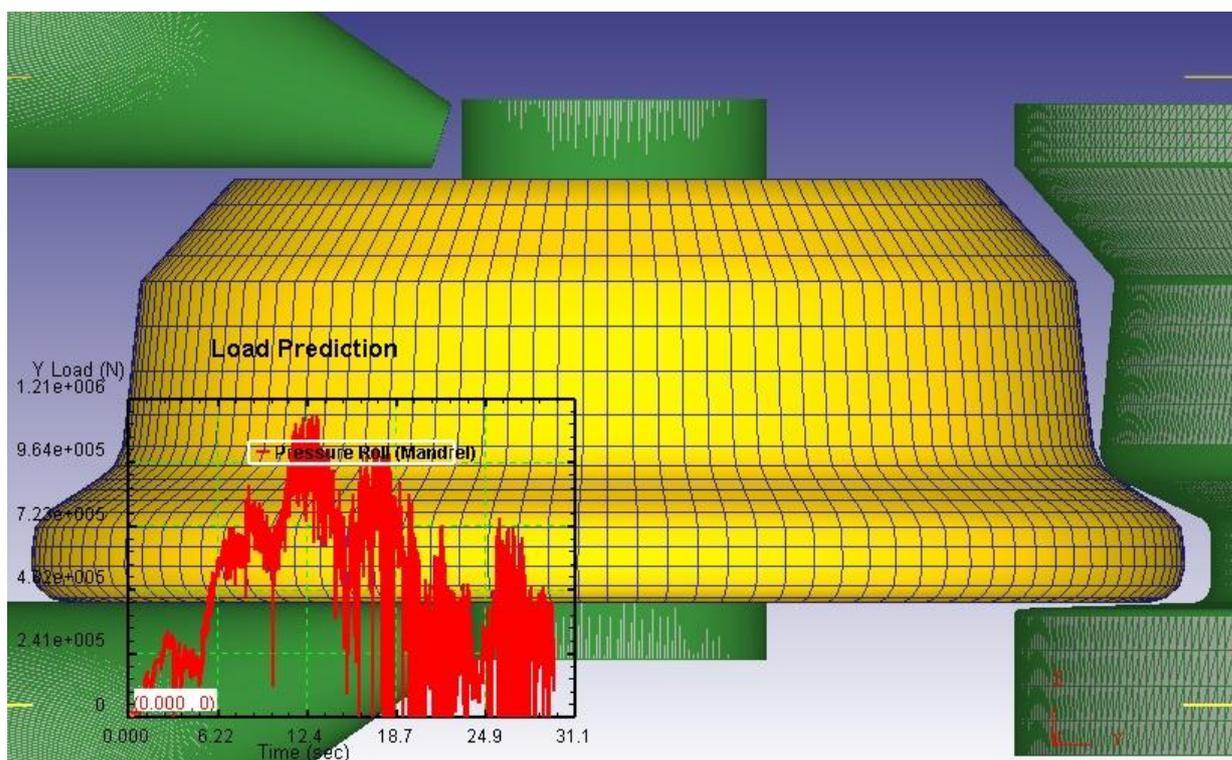


Рисунок 6.11. Визуализация моделирования процесса прокатки фланца

В процессе расчёта учитывалось влияние неравномерного температурного поля заготовки перед прокаткой. Температурный интервал поверхности заготовки составил 1040 - 1160 С.

На рисунках 6.12, 6.13 представлены результаты проверки разработанной калибровки путем конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольцевой заготовки с гребнем в калибре вертикальных валков кольцепрокатного стана.

На рисунке 6.12 представлены результаты моделирования неравномерного температурного поля в процессе прокатки (с учетом неравномерного температурного поля перед прокаткой), которое учитывалось при расчетах формоизменения металла (рисунки 6.13 а – в) и графика силы прокатки в радиальном очаге деформации (рисунок 6.13 г). Имеет место заполнение металлом всех элементов калибра, сила прокатки не превышает допустимое значение, равное 1,5 МН, что свидетельствует о правильности разработанной калибровки. На рисунке 6.14 представлены графики сил прокатки в радиальном и осевом очагах деформации.

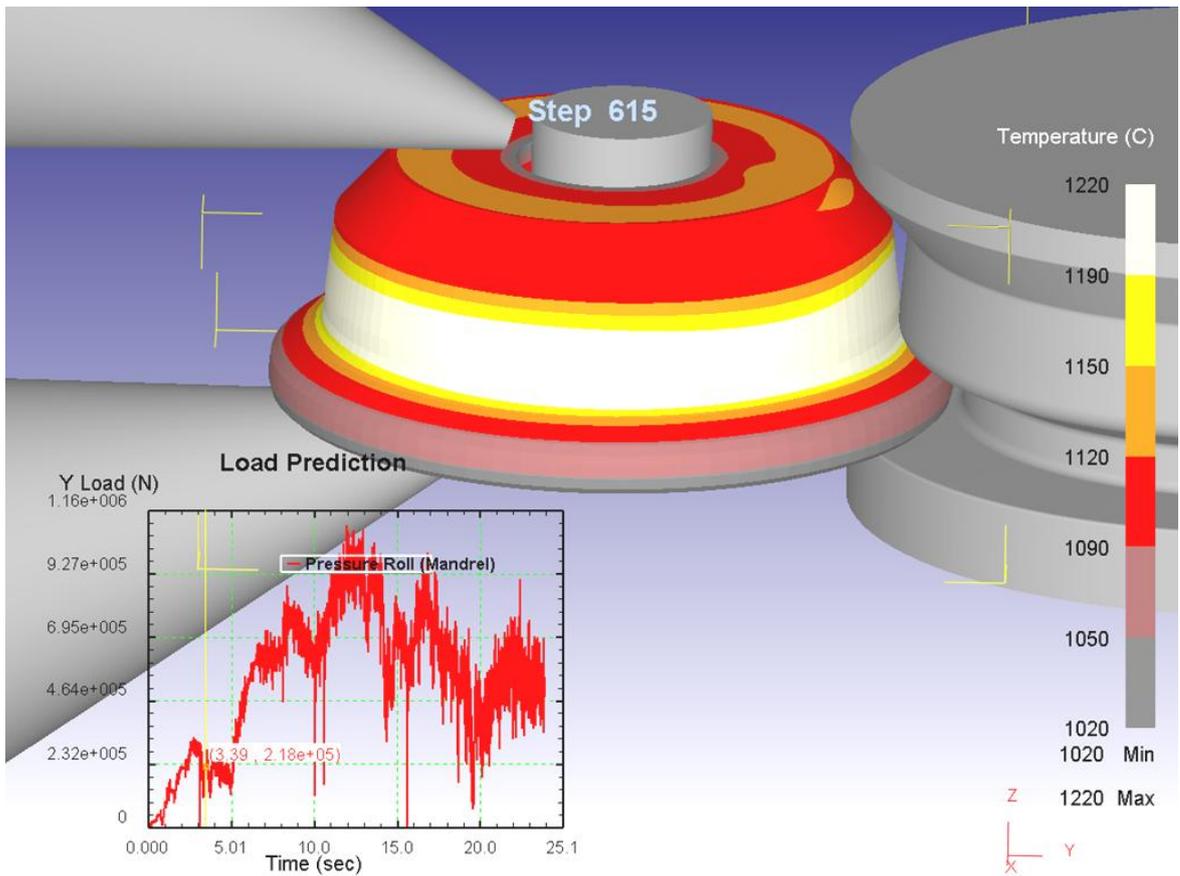


Рисунок 6.12. Моделирование температурного поля в процессе прокатки

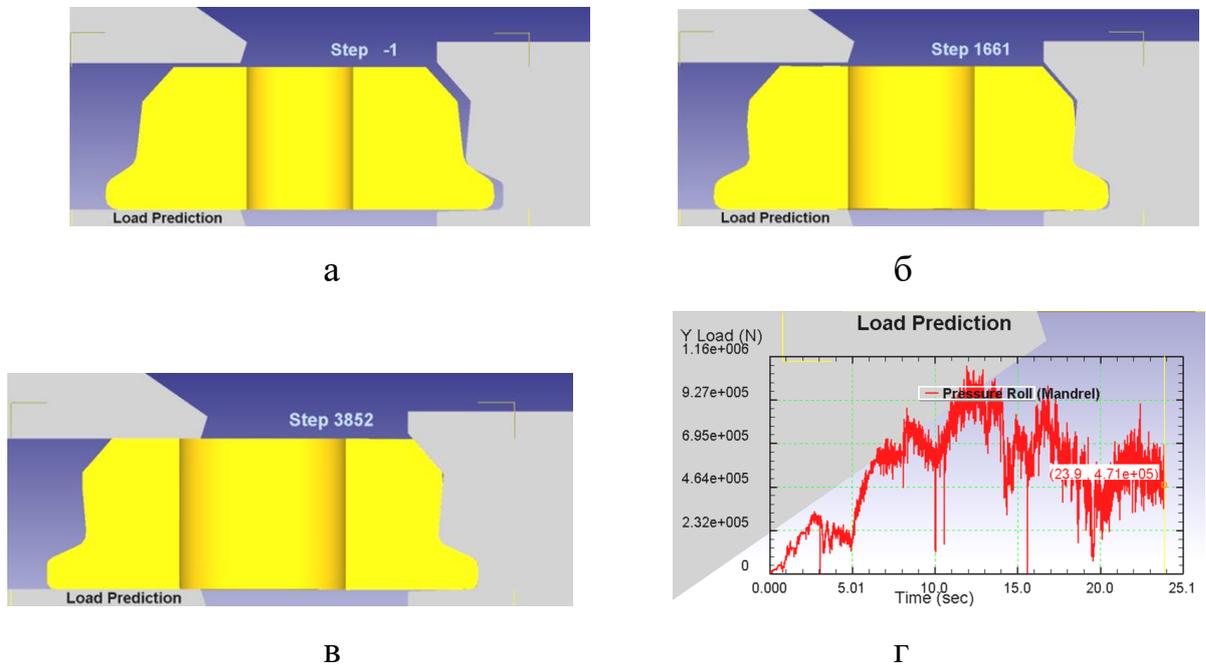


Рисунок 6.13. Конечно-элементное моделирование процесса прокатки главного вала колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане:  
 а – начальный, б – промежуточный, в – конечный момент прокатки, г – график силы прокатки

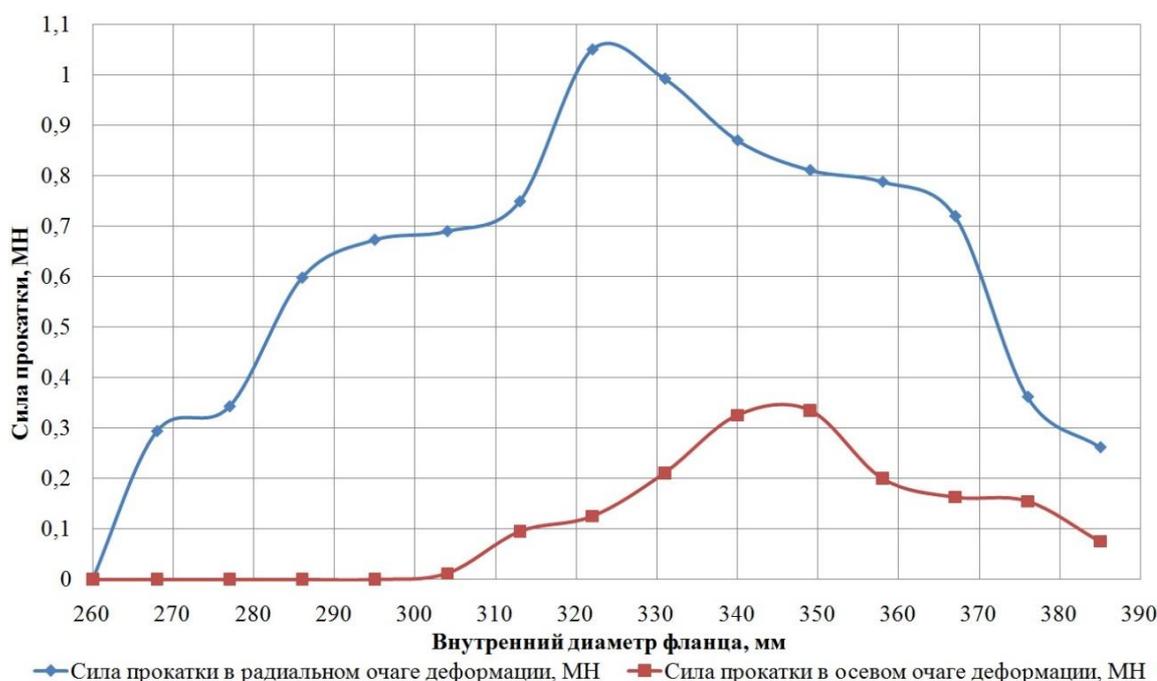


Рисунок 6.14. Силовой режим прокатки фланца с наружным гребнем

На первом этапе прокатки, который соответствует обжатию приводным валком металла в зоне границы между гребневой и кольцевой частями профиля, имеет место плавный рост силы в радиальном очаге. Интенсивный рост силы происходит при заполнении металлом гребневой части калибра и углубления в кольцевой части калибра. Более равномерное распределение обжатия металла по высоте радиального очага деформации на следующем этапе обусловило снижение силы прокатки.

На основе 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 ( $D_0 \geq 0,65D_{zom}$ ), при котором обеспечивается выкатка наружного гребня фланца на основном этапе прокатки ( $D_m \leq 0,8D_{zom}$ ) без превышения допустимого значения его внутреннего диаметра ( $D_0, D_m, D_{zom}$  — соответственно, начальный, текущий и конечный внутренний диаметр кольцевой заготовки и прокатанного кольца).

Высота исходной кольцевой заготовки равна высоте прокатанного фланца. Поэтому наклонные валки обжимают кольцо по высоте только на величину уширения, полученного от радиального обжатия металла. Соответственно, сила в осевом очаге деформации значительно меньше, чем в радиальном очаге (рисунок 6.14).

На рисунке 6.15 представлены графики изменения овальности и разнотолщинности фланца в процессе его прокатки.

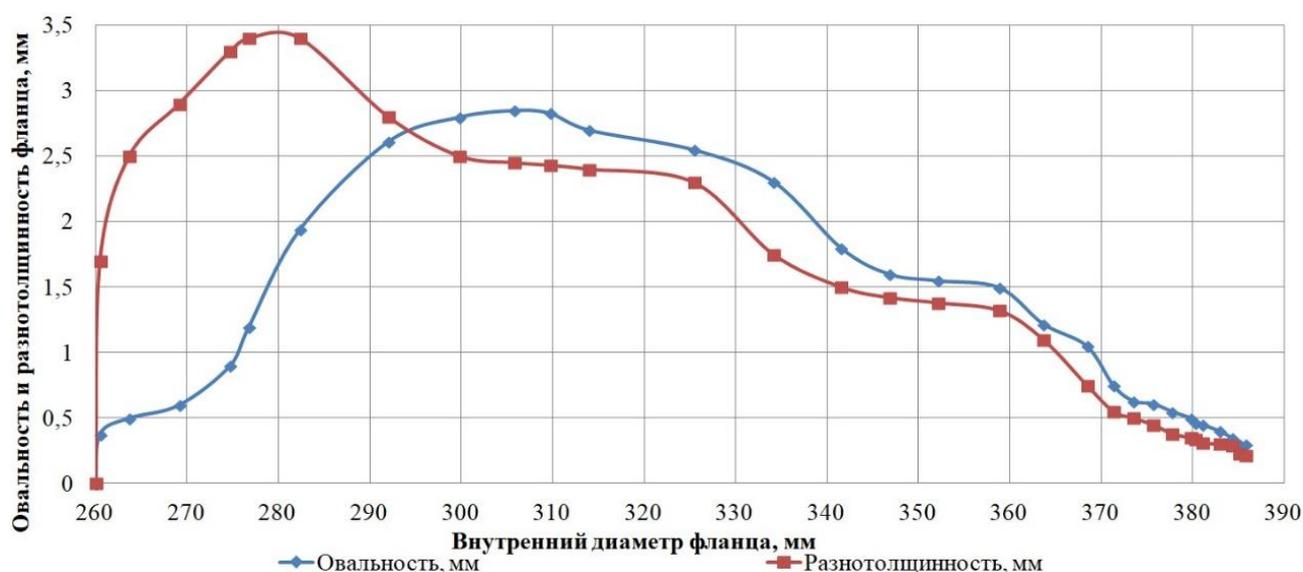


Рисунок 6.15. Динамика изменения овальности и разнотолщинности фланца

Сравнительно небольшой диаметр фланца, значительные высота и толщина стенки, а также наличие массивного наружного гребня способствуют образованию жёстких внешних (внеконтактных) зон при прокатке и, соответственно, затрудняют искажение формы и размеров фланца, что является положительным фактором.

На завершающих этапах процесса прокатки величины обжатий и, соответственно, неравномерность деформации плавно снижаются, что обеспечивает уменьшение разнотолщинности, а также овальности фланца (рисунок 6.15).

Разработанная калибровка и представленное (в зависимости от внутреннего диаметра кольца) распределение сил при прокатке в радиальном и осевом очагах деформации обеспечивают не только заполнение металлом фасонного калибра

вертикального приводного вала, но и получение требуемого внутреннего диаметра кольца, стабильность размеров которого имеет существенное значение.

### Выводы

1. 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 ( $D_0 \geq 0,65D_{zom}$ ), при котором обеспечивается выкатка наружной поверхности фланца, включая его гребень, на основном этапе прокатки ( $D_m \leq 0,8D_{zom}$ ) без превышения допустимого значения его внутреннего диаметра ( $D_0, D_m, D_{zom}$  – соответственно, начальный, текущий и конечный внутренние диаметры кольцевой заготовки и прокатанного кольца).

2. Режим обжатия металла при прокатке главного вала колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане определяется разработанными калибровками и графиками сил для радиального и осевого очагов деформации, 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. Прокатка главного вала колесопрокатного стана, контур радиального сечения которого представляет собой фланец с наружным гребнем, на кольцепрокатном стане обеспечивает экономию металла и повышение эффективности производства.

Материалы настоящего раздела опубликованы в работах [118, 119, 120].

## 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, учитываю-

щей 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, обеспечивая 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 ( $D_0 \geq 0,65D_{zom}$ ), при котором обеспечивается выкатка наружной поверхности фланца, включая его гребень, на основном этапе прокатки ( $D_m \leq 0,8D_{zom}$ ) без превышения допустимого значения его внутреннего диаметра ( $D_0, D_m, D_{zom}$  – 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 колесопркатного 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 колесопркатного стана на кольцепрокатном стане определяется разработанными калибровками, а также графиками сил для ра-

диального 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eruc, E. A summary Ring rolling technology – I. Recent trends in machines, processes and production lines / E. Eruc, R. Shivpuri // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1992. – Vol. 32, №3. – P. 379-398.

2. Eruc, E. A summary Ring rolling technology – II. Recent trends in process modeling, simulation, planning, and control / E. Eruc, R. Shivpuri // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1992. – Vol. 32, №3. – P. 399-413.

3. Material flow determination for radial flexible profile ring rolling / I. Tiedemann [et al.] // Production Engineering - Research and Development. – 2007. – №1. – P. 227-232.

4. Stanistreet, T.F. The design of a flexible model ring rolling machine / T.F. Stanistreet, J.M. Allwood, A.M. Willoughby // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 177, Iss.1-3. – P. 630-633.

5. Development of radial-axial ring rolling experimental equipment and calculation of ring rolling forces / Yu. Tan [et al.] // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 652-654. – P. 1980-1983.

6. Микульчик, С.А. Исследование, разработка и внедрение двухклетевых кольцепрокатных станков для прокатки крупногабаритных колец: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Сергей Анатольевич Микульчик. – Екатеринбург, 1995. – 23 с. – На правах рукоп.

7. Панин, В.Г. Разработка и внедрение методов формообразования при горячей раскатке экономичных фланцевых кольцевых заготовок для ГТД: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Валерий Георгиевич Панин. – Самара, 1998. – 16 с. – На правах рукоп.

8. Яковченко, А.В. Развитие теории нестационарных процессов обработки металлов давлением и технологии кольце- и бандажепрокатного производства: дис. ... док. техн. наук: 05.03.05 / Яковченко Александр Васильевич. – Донецк, 1998. – 449 с.

9. Пуллер, С. Моделирование течения материала при прокатке колец с использованием элементов теории пластичности: дис. ... док. техн. наук / Стефан Пуллер. – Ганновер, 2003. – 110 с. (Нем.).

10. Meng, W. A feeding strategy in inner L-shape ring hot rolling process / W. Meng, F. Wang, Ya. Guan // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2017. – №2017. – 17 p.

11. Xu, S.G. Numerical simulation of the microstructure in the ring rolling of hot steel / S.G. Xu, Q.X. Cao // *Journal of materials processing technology*. – 1994. – №43. – P. 221-235.

12. Sun, Z. Finite element analysis on microstructure evolution of hot ring rolling process / Z. Sun, H. Yang, X. Ou // *Materials science forum*. – 2008. – Vol. 575-578. – P. 1455-1460.

13. Qian, D. 3D coupled macro–microscopic finite element modelling and simulation for combined blank-forging and rolling process of alloy steel large ring / D. Qian, Y. Pan // *Computational Materials Science*. – 2013. – №70. – P. 24-36.

14. Establishment of hot processing maps and hot ring rolling process of 42CrMo steel / H. Chen [et al.] // *Journal of mechanical engineering*. – 2014. – Vol. 50, №16. – P 89-96. (In Chinese).

15. Quantitative design methodology for flat ring rolling process / W.Xu [et al.] // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya (Japan). – Elsevier: *Procedia Engineering*. – 2014. - №81. – P. 280-285.

16. Алимов, А.И. Совершенствование технологии изготовления колец из титанового сплава ВТ6 путем определения рациональных режимов деформирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Артем Игоревич Алимов. – Москва, 2017. – 165 с.

17. «SMS group newsletter» [electronic resource] // SMS Group. – Electronic magazine. – 2018. – Iss.3. – P. 111-115. – Access mode: <https://www.sms-group.com/press-media/media/downloads/download-detail/29116/>. – Date of the application: 15.09.2020.

18. Кольцераскатка в производстве деталей машиностроения / В. Е. Антонюк [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 188 с.

19. Костышев, В.А. Раскатка колец [Электронный ресурс] / В.А. Костышев, Б.В. Каргин. – Электрон. текстовые и граф. дан. (2,82 Мб). – Самара.: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

20. Гринфельд, Л.А. Автоматическая линия для производства заготовок крупных колец и бандажей колёс / Л.А. Гринфельд, В.А. Агеенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1998. – №12. – С. 20-22.

21. Калмыков, Б.В. Кольцераскатные станы и линии для производства кольцевых заготовок / Б.В. Калмыков // Тяжелое машиностроение. – 2001. - №5. – С. 25-29.

22. «Radial and radial-axial ring rolling machines» [electronic resource] // SMS Group. – Electronic data – 2017. – 04.08.2017. – 12 p. – Access mode: <https://www.sms-group.com/press-media/media/downloads/download-detail/17562/>. – Date of the application: 15.09.2020.

23. Производство горячедеформированных колец в условиях АО «Металлургический завод «Электросталь» / И. М. Таупек [и др.] // Сборник материалов Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции: Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Том 2: «Горно-металлургическое машиностроение» «Автоматизация и управление в технических и организационно-экономических системах» «Новые материалы», 25-27.11.2015, Старый Оскол (Россия). – Старый Оскол: Старооскольский технологический институт, 2015. – С. 108-113.

24. Гурулев, Д. Н. Влияние формы инструмента на механические свойства кольцевой заготовки при раскатке / Д. Н. Гурулев, Л. В. Палаткина // Известия ВолгГТУ. – 2018. – Том 213, №3. – С. 84-86.

25. Влияние формы бойка на интенсивность деформации при раскатке кольцевой заготовки / Д. Н. Гурулев [и др.] // Известия ВолгГТУ. – 2020. – Том 239, №4. – С. 30-32.

26. Linsinger. Innovation, technology and highest productivity [Electronic resource] // LINSINGER Maschinenbau Gesellschaft m.b.H. – Electronic data. – 2018. – April. – 36 p. – Access mode: [https://www.linsinger.com/wp-content/uploads/2019/05/linsinger\\_folder\\_general\\_English.pdf](https://www.linsinger.com/wp-content/uploads/2019/05/linsinger_folder_general_English.pdf). – Date of the application: 15.09.2020.

27. Уральский металлургический завод [Электронный ресурс]: Сайт ООО «Уральский металлургический завод». – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.uralmz.ru/>. – Дата обращения: 15.09.2020.

28. PRESSTEC [Electronic resource]: PRESSTEC-Group website. – Electronic data. – Access mode: <https://www.presstec.com/press-construction/rph-s-hydraulic-forging-press-10mn-80mn>. – Date of the application: 15.09.2020.

29. Wang, X.K. Modelling and simulation of guide roller control mode for vertical hot ring rolling process / X.K. Wang, L. Hua // Ironmaking and steelmaking. – 2011. – Vol.38, №2. – P. 129-138.

30. Wang, M. Influences of geometric factors on rolling force and moment in hot ring rolling of large parts / M. Wang // Advanced materials research. – 2012. – Vol. 433-440. – P. 563-566.

31. Feng, Z. Modelling and simulation of radial ring rolling process based on finite element analyses / Z. Feng, H. Champlaud // Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2013, 14-18 July 2013, Paris (France). – USA: American Society of Mechanical Engineers, 2013. – 5 p.

32. Sun, B. Numerical and experimental investigations on the effect of mandrel feeding speed for high-speed rail bearing inner ring / B. Sun, J. Xu, C. Xing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 100 №16. – P. 1993-2006.

33. Research on automatic loading & unloading technology for vertical hot ring rolling process / X. Wang [et al.] // 4th International Conference on New Forming Technology 2015, 6-9.08.2015, Glasgow (United Kingdom). – Glasgow: EDP Sciences, 2015. - №21. – 6 p.

34. Soft measurement model of ring's dimensions for vertical hot ring rolling process using neural networks optimized by genetic algorithm / X. Wang [et al.] // Journal of Central South University. – 2017. – №24. – P. 17–29.

35. Панин В.Г. Изучение выкатываемости фланцевых колец и факторов интенсификации их формообразования / В.Г. Панин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – №9. – С. 37-40.

36. МЕЧЕЛ [Электронный ресурс]: Сайт ПАО «МЕЧЕЛ». – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://www.mechel.ru/sector/steel/uralskaya-kuznitsa/history/>. – Дата обращения: 15.09.2020.

37. РУСПОЛИМЕТ [Электронный ресурс]: Сайт ПАО «РУСПОЛИМЕТ». – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.ruspolymet.ru/istoriya-predpriyatiya/>. – Дата обращения: 15.09.2020.

38. Освоение радиально-осевого кольцераскатного стана RAW 160(200)/160(200) – 3000/630 / С.В. Путов [и др.] // Сталь. – 2017. – №9. – С. 46-48.

39. «Ore&Metals» [Электронный ресурс]: Сайт Издательский дом «Руда и металлы» – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.rudmet.ru/news/2389/?language=en>. – Дата обращения: 15.09.2020.

40. Металлургический завод Электросталь [Электронный ресурс]: Сайт АО «Металлургический завод «Электросталь». – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://www.elsteel.ru/about-ru/production-ru>. – Дата обращения: 15.09.2020.

41 Siempelkamp Maschinen- und Anlagenbau. Siempelkamp Ring-Rolling Mill [Electronic resource] // Siempelkamp Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG. – Electronic data. – Access mode: [https://www.siempelkamp.com/fileadmin/user\\_upload/Metall/Metall\\_Downloads/Siempelkamp-Ringwalze-EN.pdf](https://www.siempelkamp.com/fileadmin/user_upload/Metall/Metall_Downloads/Siempelkamp-Ringwalze-EN.pdf). – Date of the application: 15.09.2020.

42. VSMPO orders forging / ring rolling line for titanium alloys [Electronic resource] // SMS Group. Press Release. – Electronic data. – 2014. – February. – 3 p. – Access mode: <https://www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/sms-meer-224/pdf/download/>. – Date of the application: 15.09.2020.

43. VSMPO Grants SMS Group FAC for a combined forging/ring rolling line for titanium alloys [Electronic resource] // SMS Group. Press Release. – Electronic data. – 2017. – March. – 5 p. – Access mode: <https://www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/vsm-po-grants-sms-group-fac-for-a-combined-forging-ring-rolling-line-for-titanium-alloys-729/pdf/download/>. – Date of the application: 15.09.2020.

44. Guo, L. Numerical modelling and simulation of radial-axial ring rolling process / L. Guo, H. Yang // Numerical Analysis – Theory and Application. – 2011. – Chapter 17. – P. 373-394.

45. Optimization and simulation of machining parameters in radial-axial ring rolling process / S. Tang [et al.] // International Journal of Computational Intelligence Systems. – 2011. – Vol. 4, №3. – P. 337-344.

46. Kim, N. Optimal design to reduce the maximum load in ring rolling process / N. Kim, H. Kim, K.Jin // International journal of precision engineering and manufacturing. – 2012. – Vol. 13, №10. – P. 1821-1828.

47. Giorleo, L. Energy consumption reduction in Ring Rolling processes: A FEM analysis / L. Giorleo, E. Ceretti, C. Giardini // International Journal of Material Sciences. – 2013. – №74 – P. 55-64.

48. Giorleo, L. Speed roll laws influence in a ring rolling process / L. Giorleo, E. Ceretti, C. Giardini // Key Engineering Materials. – 2013. – №554-557. – P.337- 334.

49. Giorleo, L. Validation of hot ring rolling industrial process 3D simulation / L. Giorleo, C. Giardini, E. Ceretti // International Journal of Material Forming. – 2013. – №6 – P. 145-152.

50. Giorleo, L. Speed idle roll law optimization in a ring rolling process / L. Giorleo, E. Ceretti, C. Giardini // Key Engineering Materials. – 2015. – №651-653. – P.248- 253.

51. Modeling and application of ring stiffness condition for radial-axial ring rolling / Lin Hua [ta al.] // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2016. – №110. – P. 66-79.

52. Schwich, G. Realistic modeling of the tool kinematics of radial-axial ring rolling machines in finite element simulation / G. Schwich, V. Jenkouk, G. Hirt //

Proceedings of the 19th International ESAFORM Conference on Material Forming 2016, 27-29.04.2016, Nantes (France). – Nantes: AIP Publishing, 2016. – 6 p.

53. Husmann T. Online-analysis of process-data to avoid ovality in radial-axial ring rolling processes / T. Husmann, S. Husmann, and B. Kuhlenkötter // Proceedings of the 20th International ESAFORM Conference on Material Forming 2017, 26-28.04.2017, Dublin (Ireland). – Dublin: AIP Publishing, 2017. – 6 p.

54. Quagliato, L. Thermo-mechanical analytical formulations for geometry, strain, temperature and force estimation in the RARR process of flat rings / L. Quagliato, G.A. Berti // XIII Convegno dell'Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica (AITEM) 2017, 11-13.9.2017, Piza (Italia). – Piza: Universita di Pisa, 2017. – 10 p.

55. Driver roll speed influence in ring rolling process / G. Allegri [et al.] // 12th International Conference on the Technology of Plasticity (ITCP), 17-22.9.2017, Cambridge (United Kingdom). – Cambridge: Procedia Engineering, 2017. – P. 1230-1235.

56. Allegri, G. Ring rotational speed trend analysis by FEM approach in a ring rolling process / G. Allegri, L.Giorleo, E.Ceretti // Proceedings of the 21st International ESAFORM Conference on Material Forming 2018, 23-25.04.2018, Palermo (Italy). – University of Palermo: AIP Publishing, 2018. – 6 p.

57. Производство железнодорожных колес / Г.А. Бибик [и др.]. – М.: Metallurgy, 1982. — 232 с.

58. А.с. №1733172 СССР, МПК В21Н1/08. Способ производства кольцевых изделий с наружным гребнем / А.В. Яковченко [и др.], Нижнеднепровский трубопрокатный завод им. Карла Либкнехта. – №4731311/27; заявл. 11.04.89; опубл. 15.05.92, Бюл. №18. – 4с.

59. Освоение технологии производства локомотивных бандажей с использованием одного прокатного стана / А.В. Яковченко [и др.] // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: металургія. – 2001. – №31. – С. 115-121.

60. Пат. №49162 Украина, МПК В21Н1/08. Способ прокатки локомотивных бандажей на одном стане / А.В. Яковченко [и др.]; Открытое акционерное обще-

ство «Нижнеднепровский трубопрокатный завод». – №2001020918; заявл 12.02.2001; опубл. 16.09.2002, Бюл №9. – 7с.

61. Solomonov, K.N. Application of CAD/CAM Systems for Computer Simulation of Metal Forming Processes / K.N. Solomonov // Materials Science Forum. – 2012. – Vol. 704-705, P. 434-439.

62. Соломонов, К.Н. Автоматизация проектирования процессов изготовления поковок / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук, А.К. Соломонова // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ - 2015): сборник трудов VIII международной конференции, 22-26 сентября 2015, Воронеж. – Саратов: «Научная книга», 2015. – С. 340-342.

63. Соломонов К.Н. Автоматизированное проектирование инструмента и технологий объемной штамповки (обзор) // Кузнечно-штамповочное производство. – 2003. – № 8. – С. 42-48.

64. Лежнев С., Панин Е. Использование программного комплекса DEFORM 2D/3D в научной работе и учебном процессе // САПР и графика. – 2009.–№ 5.– С. 2-3.

65. Писаренко, Ф.А. Применение ЭВМ, оснащенных графическими дисплеями, для калибровок валков сложных фасонных профилей / Ф.А. Писаренко, Ф.Е. Долженков. – Донецк: ИЭП АН УССР, 1978. – 43 с.

66. Яковченко, А.В. Проектирование профилей и калибровок железнодорожных колес: монография / А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, Р.А. Гольшков. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 491 с.

67. Снитко, С.А. Автоматизированное проектирование колес, калибровок, инструмента деформации и процессов в колесопрокатном производстве: монография / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева. – Донецк: «Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ», 2017. – 342 с.

68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. Биба Н.В., Стебунов С.А. Применение программы QFORM 2D/3D для разработки малоотходной технологии штамповки // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Пластична деформація металів. – 2002. – Том 5. – С. 221-226.

72. Development of a CDA/CAM system for the closed-die forging process / M. Jolgaf [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – №138. – P. 436-442.

73. Design and manufacturing of a straight bevel gear in hot precision forging process using finite volume method and CAD/CAE technology / S. Khalilpourazary [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 56, №1-4. – P. 87-95.

74. Bhatt, M.R. An expert system of die design for multi stage deep drawing process / M.R. Bhatt, S.H. Buch // Procedia engineering: 11th international symposium on plasticity and impact mechanics, 11-14.12.2016, New Delhi (India). – New Delhi: Elsevier procedia, 2017. – Vol. 173. – P. 1650-1657.

75. Эффективные стратегии проектирования и оптимизации процесса при прокатке колец / Г. Швих [и др.] // Черные металлы. – 2014. - №7. – С. 41-49.

76. The key technology and realization of virtual ring rolling / Z.W. Wang [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – №182. – P.374-381.

77. Process design by FEM simulation for shape ring rolling of large-sized ring / Y.S. Lee [et al.] // NUMIFORM 2010: Proceedings of the 10th International Confe-

rence on Numerical Methods in Industrial Forming Processes Dedicated to Professor O. C. Zienkiewicz (1921–2009), 13-17 June 2010, Pohang (Republic of Korea). – College Park: American Institute of Physics, 2010. – Vol. 1252. – P. 964-971.

78. Design method for intermediate roll in multi-stage profile ring rolling process: the case for excavator idler rim / K.H. Lee [et al.] // International Journal of Processing and Manufacturing. – 2014. – Vol.15, №3. – P.503-512.

79. Kang, J.H. Research on filling limit of profile ring rolling on circumferential surface / J.H. Kang // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2014. – Vol.4, Iss.12. – P. 40-45.

80. Development of L-sectioned ring for construction machines by profile ring rolling process / C.J. Lee [et al.] // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2016. – Vol. 17, №2. – P. 233-240.

81. Parametric design of ring billet for profile ring rolling process based on electric field method and feeding strategy design / W. Xu [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – № 93. – P.1017-1027.

82. 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.

83. Davey, K. A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation / K. Davey, M.J. Ward // International Journal of Mechanical Sciences. – 2002. – №44. – P. 165–190.

84. Three-dimensional UBET simulation tool for seamless ring rolling of complex profiles / V. Ranatunga [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2004. – Vol. 6, №2. – P. 180-186.

85. Parvizi, A. Slab analysis of ring rolling assuming constant shear friction / A. Parvizi, K. Abrinia, M. Salimi // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2011. – Vol. 20, №9. – P 1505-1511.

86. Quagliato, L. Statically determined slip-line field solution for the axial forming force estimation in the radial-axial ring rolling process / L. Quagliato, G. Berti // 20th International ESAFORM Conference on Material Forming 2017, 26-28.04.2017, Dublin (Ireland). – Dublin City University: AIP Publishing, 2017. – Vol. 1896. – 6 p.

87. Яковченко, А.В. Экспериментальные исследования энергосиловых и температурных параметров при нестационарном процессе прокатки колец / А.В. Яковченко // Металл и литьё Украины. – 1997. – №1. – С.44-45.

88. Яковченко, А.В. Экспериментальные исследования процесса прокатки локомотивных бандажей на одном стане / А.В. Яковченко, А.Ю. Лоскутов // Металл и литьё Украины. – 2002. – №1-2. – С. 52-54.

89. Arthington, M. Control of ring rolling with variable thickness and curvature / M. Arthington, J. Havinga, S. Duncan // International Journal of Material Forming. – 2020. – Vol.13, №2. - P. 161–175.

90. Real-time measurement of ring-rolling geometry using low-cost hardware / M. Arthington [et al.] // 10th UKACC International Conference on Control 2014, 9-11.07.2014, Loughborough (United Kingdom). – Loughborough: IEEE, 2014. – P. 603-608.

91. Костышев, В.А. Кинетика течения металла в очаге деформации при раскатке кольцевых деталей / В.А. Костышев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Том.17, №6 (3) – С.623-628.

92. Соломонов, К.Н. Компьютерное моделирование формообразования поковок / К.Н. Соломонов, Л.И. Тищук, А.К. Соломонова // Информатика: проблемы, методология, технологии: сборник трудов XV Межд. науч.-метод. конф., 12-13 февраля 2015 г., Воронеж. В 3 т. Т. 2. Компьютерное моделирование в фундаментальных и прикладных исследованиях. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2015. – С. 428-432.

93. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

94. Николаев, В.А. Теория и практика процессов прокатки: учеб. пособие. – Запорожье: ЗГИА, 2002. – 232 с.

95. Андреюк, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев, Б.С. Прицкер // Сталь. – 1972. – №6. – С. 522-523.

96 Control method for centering rolls in radial-axial ring rolling process / K.H. Lee [et al.] // International Journal of Processing and Manufacturing. – 2014. – Vol.15, №3. – P.535 – 544.

97. Lee, K.H. Advanced feasible forming condition for reducing ring spreads in radial-axial ring rolling / K.H. Lee, B.M. Kim // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – №76. – P. 21-32.

98. Meng, W. Effects of key simulation parameters on conical ring rolling process / W. Meng, G. Zhao // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya (Japan). – Elsevier: Procedia Engineering. – 2014. - №81. – P. 286-291.

99. Husman, S. Determination of influencing factors on ring climbing in radial-axial ring rolling via design of experiments / S. Husman, B. Kuhlenkötter // Advanced materials research. – 2016. – Vol. 1140. – P. 19-26.

100. Яковченко, А.В. Исследование уширения при прокатке кольцевых изделий на основе функционала полной мощности / А.В. Яковченко, А.Ю. Лоскутов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. пр – 2002. – С. 311-314.

101. Яковченко, А.В. Аналитические методы моделирования нестационарных процессов обработки металлов давлением: монография. – Донецк: «Донничермет», 1997. – 177 с.

102. Anjami, N. Investigation of rolls size effects on hot ring rolling process by coupled thermo-mechanical 3D-FEA / N. Anjami, A. Basti // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – №210. – P.1364-1377.

103. Рябыкин, Н.М. Методика расчета основных параметров раскатных кольцевых заготовок / Н.М. Рябыкин, Ю.В. Процив // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2003. – №12. – С. 19-30.

104. Рябыкин, Н.М. Методика расчета непрерывно изменяющихся в процессе раскатки параметров кольцевых заготовок / Н.М. Рябыкин, Ю.В. Процив // Производство проката. – 2005. – №9. – С. 12-25.

105. Процив, Ю.В. Расчет суммарных степеней деформации при многопереходной раскатке кольцевых заготовок / Ю.В. Процив // Производство проката. – 2012. – №3. – С. 25-27.

106. Deform 3D v6.1 Ring Rolling System Manual. – Columbus: Scientific Forming Technologies Corporation, 2007. – 30 p.

107. Mathematic modeling and FE simulation of radial-axial ring rolling large L-section ring by shape axial roll / P. Zhou [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 72, №5-8. – P. 729-738.

108. Солод, В.С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей / В.С. Солод, Я.Е. Бейгельзимер, Р.Ю. Кулагин // Металл и литье Украины. 2006. № 7-8. С. 52 – 56.

109. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.

110. Снитко, С.А. Влияние параметров конечно-элементных моделей на точность расчета формоизменения металла и сил при штамповке и прокатке заготовок железнодорожных колес / С.А. Снитко, А.А. Дужуржи // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск, 2010. – Вып. 1(22). – С. 44-48.

111. Yanagida, A. A novel approach to determine the kinetics for dynamic recrystallization by using the flow curve / A. Yanagida, J. Yanagimoto // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol.151, Iss.1-3. – P. 33-38.

112. Яковченко, А.В. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации: учеб. пособие для обучающихся образоват. учреждений высш. проф. образования / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, Н.И. Ивлева. – Донецк: ДОННТУ, 2018. – 197 с.

113. Снитко, С.А. Научные основы автоматизированного проектирования рабочих органов агрегатов и технологии штамповки и прокатки колёс:

дис. ... док. техн. наук: 05.16.05; 05.02.13 / Снитко Сергей Александрович. – Донецк, 2018. – 393 с.

114. 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.

115. 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.

116. 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.

117. 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)

118. Разработка калибровки для прокатки главного валка 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.

119. 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.

120. 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.

121. 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.

122. Обработка цветных металлов и сплавов давлением / К.Н. Богоявленский [и др.]. – М.: Металлургия, 1973. – 472 с.

123. 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.

124. 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.

125. 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.

Приложение А. Окна программы разработки эмпирических формул для расчета коэффициентов напряженного состояния и коэффициента плеча силы прокатки

Материал кольца

Химический состав материала кольца (%)

C (0.05 - 1.1)	0.43
Si (0 - 1.65)	0.26
Mn (0.03 - 1.55)	0.74
Cr (0 - 0.3)	0
Ni (0 - 0.3)	0
P (0 - 0.05)	0.022
S (0 - 0.05)	0.016
V (0 - 0.26)	0
Cu (0 - 0.28)	0

1) Диаметр приводного вала, мм	850
2) Диаметр вала-оправки, мм	160
3) Диаметр шейки вала-оправки, мм	150
4) Длина шейки вала-оправки, мм	120
5) Диаметр наклонного вала, мм	300
6) Линейная скорость вращения приводного вала, м/с	1.2
7) Высота исходной кольцевой заготовки, мм	200
8) Внутренний диаметр исходной кольцевой заготовки, мм	162.5
9) Высота готового кольца, мм	200
10) Толщина готового кольца, мм	18.6
11) Наружный диаметр готового кольца, мм	1530.7
12) Температура начала прокатки, град.С	1040
13) Температура конца прокатки, град.С	890

1) Допустимая сила прокатки в радиальном очаге, МН	1.6
2) Допустимая сила прокатки в осевом очаге, МН	1.2
3) Допустимая мощность прокатки,квт	500
4) Предел прочности стали вала-оправки, МПа	700
5) Допустимая скорость перемещения вала-оправки, мм/с	10
6) Количество оборотов на 1-ом этапе прокатки	4
7) Скорость роста диаметра кольца в конце 1-го этапа прокатки, мм/с	13.99356
8) Коэффициент для точки 3 (начало 3-го этапа прокатки)	0.93
9) Коэффициент для точки 4 (начало 4-го этапа прокатки)	0.99
10) Допустимая скорость роста диаметра кольца на 2-ом этапе прокатки, мм/с	14.2
11) Допустимая скорость роста диаметра кольца на 3-ем этапе прокатки, мм/с	4.7
12) Скорость роста диаметра кольца на 4-ом этапе прокатки, мм/с	2
13) Доля обжатия по высоте от уширения (0 - 1)	1
14) Точность приближения к заданной скорости роста диаметра на 2-ом этапе прокатки, мм/с	0.0001
15) Точность приближения к заданной скорости роста диаметра на 3-ем этапе прокатки, мм/с	0.0001
16) Точность приближения к заданной скорости роста диаметра на 4-ом этапе прокатки, мм/с	0.0001
17) Начальное обжатие в итерационном процессе, мм	0.7

Рисунок А.1. Исходная информация

Кольцевая заготовка											
		Толщина, мм	105.101	Высота, мм	200.000	Внутр. диаметр, мм	162.500				
Готовое кольцо											
		Толщина, мм	18.600	Высота, мм	200.000	Наружн. диаметр, мм	1530.700				
N об.	$t_c$	$dt_c$	$(h+dh)_{mm}$	$h_{mm}$	$(b+db)_{mm}$	$b_{mm}$	$D_{нар,mm}$	$D_{вн,mm}$	$VD_{н,mm/c}$	$VD_{вн,mm/c}$	$V_{опр,mm/c}$
1	0.976	0.976	105.101	102.270	200.849	200.849	376.115	171.575	3.498	9.301	2.901
2	1.960	0.985	102.270	99.455	201.694	201.694	379.872	180.962	3.816	9.533	2.859
3	2.955	0.995	99.455	96.168	202.680	202.680	384.758	192.422	4.913	11.523	3.305
6	6.055	1.065	86.482	80.913	205.574	203.788	422.049	260.224	14.200	23.650	5.228
9	9.494	1.189	72.821	68.762	204.767	203.427	470.891	333.366	14.200	20.353	3.415
12	13.332	1.326	62.648	59.458	204.133	203.046	525.384	406.468	14.200	18.520	2.406
15	17.613	1.480	54.573	51.959	203.567	202.648	586.183	482.266	14.200	17.361	1.767
18	22.391	1.651	47.924	45.725	203.034	202.236	654.019	562.569	14.200	16.575	1.332
21	27.721	1.842	42.320	40.437	202.523	201.818	729.704	648.830	14.200	16.015	1.023
24	33.667	2.055	37.519	35.887	202.030	201.402	814.148	742.375	14.200	15.606	0.795
27	40.302	2.293	33.358	31.930	201.561	201.002	908.365	844.504	14.200	15.299	0.623
30	47.705	2.558	29.718	28.462	201.129	200.635	1013.484	956.560	14.200	15.066	0.491
33	55.964	2.854	26.510	25.403	200.752	200.324	1130.769	1079.963	14.200	14.886	0.388
36	65.180	3.185	23.666	22.690	200.455	200.099	1261.625	1216.246	14.200	14.746	0.306
39	75.461	3.553	21.130	20.272	200.274	200.001	1407.625	1367.081	14.200	14.637	0.241
42	86.654	3.776	19.793	19.522	200.081	200.000	1460.228	1421.184	4.700	4.831	0.072
45	98.264	3.918	19.061	18.800	200.078	200.000	1514.796	1477.195	4.700	4.821	0.067
47	106.216	3.986	18.710	18.600	200.033	200.000	1530.700	1493.500	2.000	2.050	0.028

Рисунок А.2. Окно компьютерной программы расчета текущих параметров процесса прокатки кольца

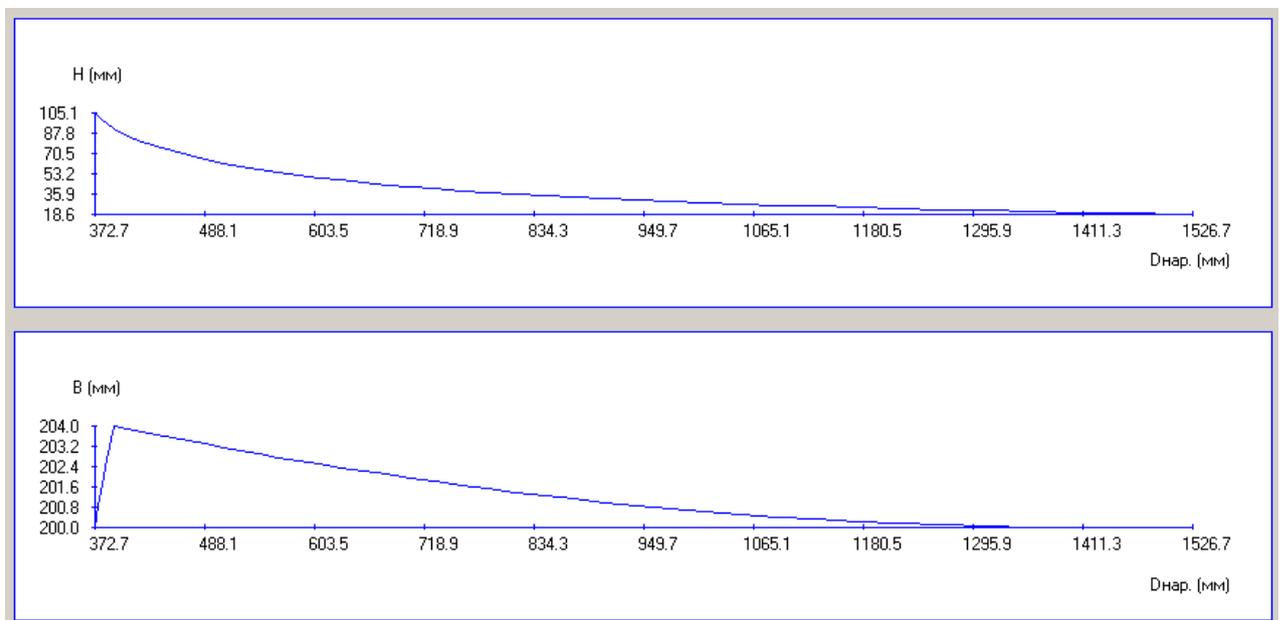


Рисунок А.3. Зависимость толщины  $H$  и высоты  $B$  в радиальном очаге деформации от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

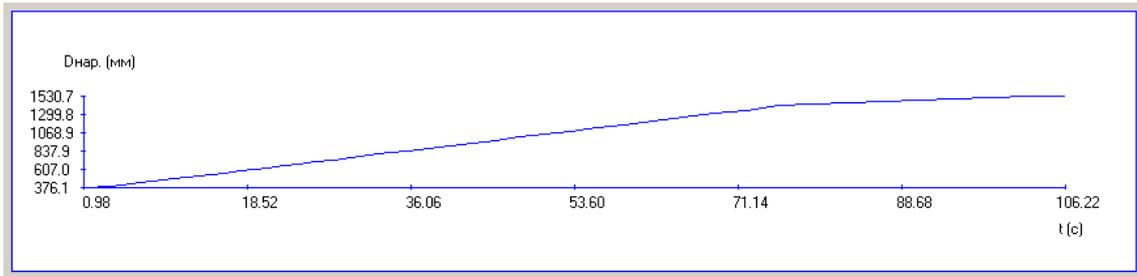


Рисунок А.4. Зависимость наружного диаметра кольца  $D_{нар}$  от времени  $t$

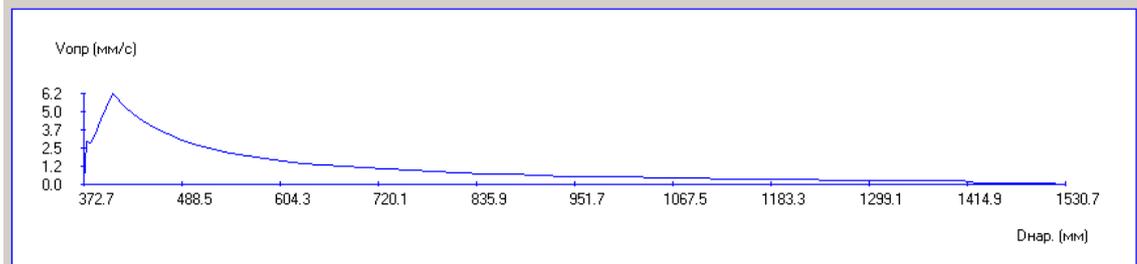
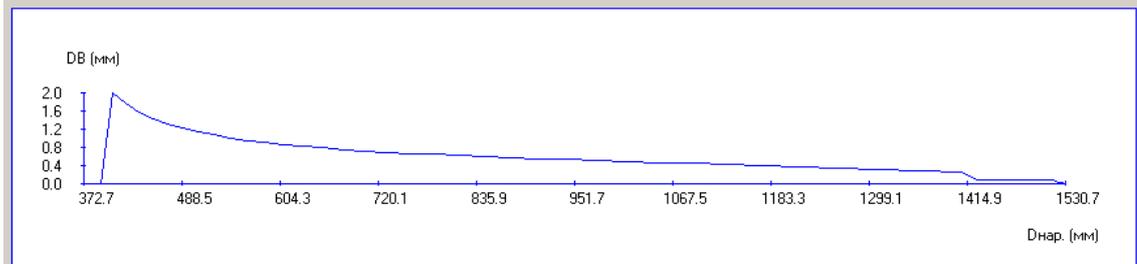
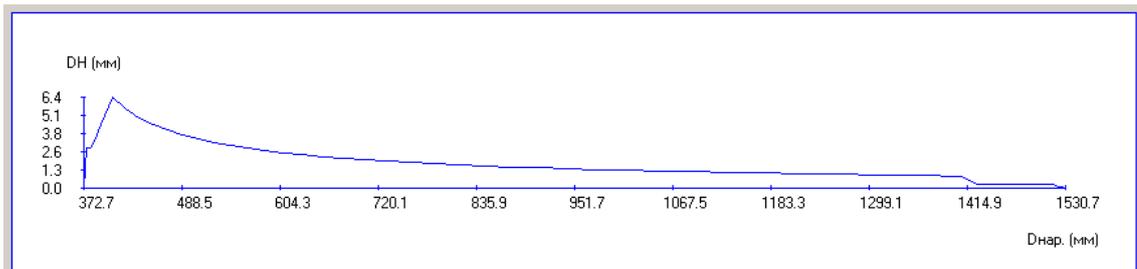
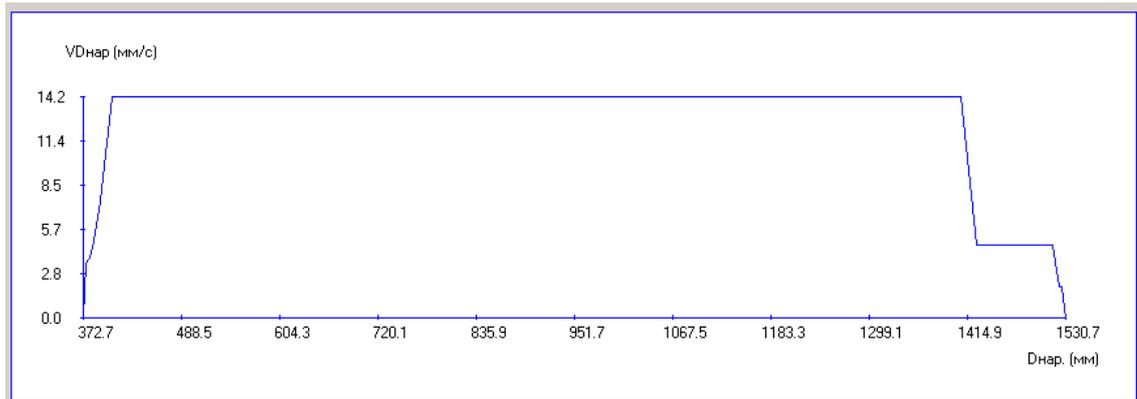


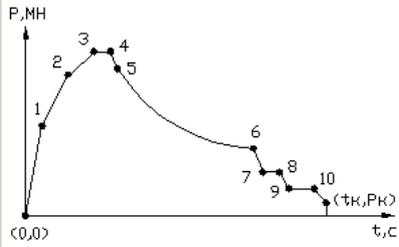
Рисунок А.5. Зависимость скорости роста наружного диаметра кольца  $VD_{нар}$ , обжатий  $DH$  и  $DB$  в радиальном и осевом очагах деформации соответственно, скорости движения валка-оправки  $V_{опр}$  в радиальном очаге деформации от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

## Расчет сил прокатки

- переход к опытным данным
- опытные данные отсутствуют (использовать информацию из каталога)

**Задание значений P**

таблица     график



N	t,c	P,МН
1		
2		
3		
4		

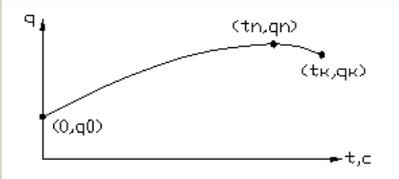
**Определение значений силы P и q на каждом обороте кольца на основе опытных данных**

Количество

Количество оборотов

**Задание значений q**

таблица     график



t<sub>n,c</sub>    q<sub>0</sub>    q<sub>n</sub>    q<sub>k</sub>

**Таблица опытных значений P и (или) q**

N	t,c	P,МН	q
1	0.976	0.370	0.627
2	1.960	0.375	0.655
3	2.955	0.380	0.684
4	3.962	0.498	0.711
5	4.989	0.600	0.739
6	6.055	0.592	0.768
7	7.160	0.570	0.797
8	8.306	0.543	0.826
9	9.494	0.521	0.856
10	10.727	0.500	0.887
11	12.006	0.500	0.917
12	13.332	0.500	0.948
13	14.707	0.500	0.980
14	16.134	0.477	1.011
15	17.613	0.448	1.043
16	19.148	0.417	1.075
17	20.74	0.400	1.107
18	22.391	0.400	1.138
19	24.103	0.400	1.170

**Результаты расчетов**

N	t,c	P,МН	q
1	0.976	0.370000	0.627000
2	1.960	0.375000	0.655000
3	2.955	0.380000	0.684000
4	3.962	0.498000	0.711000
5	4.989	0.600000	0.739000
6	6.055	0.592000	0.768000
7	7.160	0.570000	0.797000
8	8.306	0.543000	0.826000
9	9.494	0.521000	0.856000
10	10.727	0.500000	0.887000
11	12.006	0.500000	0.917000
12	13.332	0.500000	0.948000
13	14.707	0.500000	0.980000
14	16.134	0.477000	1.011000
15	17.613	0.448000	1.043000
16	19.148	0.417000	1.075000
17	20.740	0.400000	1.107000
18	22.391	0.400000	1.138000
19	24.103	0.400000	1.170000

<<Назад    Далее>>

Рисунок А.6. Окно программы интерполяции экспериментальных значений силы прокатки  $P$  коэффициента  $q = L_1 / L_2$

Кольцевая заготовка									
Толщина, мм			105.101	Высота, мм		200.000	Внутр. диаметр, мм		162.500
Готовое кольцо									
Толщина, мм			18.600	Высота, мм		200.000	Наржн. диаметр, мм		1530.700
N об.	qr	F1, мм2	F2, мм2	вср, мм	eps	U, 1/с	T, град. С	sig, МПа	
1	0.627000	5014.436	7997.501	200.849	0.027	0.719	1039.558	45.369	
2	0.655000	4651.553	7101.605	201.694	0.028	0.828	1039.071	46.798	
3	0.684000	4782.115	6991.396	202.680	0.034	1.013	1038.438	50.950	
6	0.768000	5481.378	7137.211	204.681	0.067	1.993	1033.608	69.863	
9	0.856000	4638.054	5418.288	204.097	0.057	2.295	1027.281	69.113	
12	0.948000	4231.560	4463.670	203.589	0.052	2.520	1020.222	69.468	
15	1.043000	3987.480	3823.085	203.108	0.049	2.711	1012.347	70.532	
18	1.138000	3815.725	3353.009	202.635	0.047	2.885	1003.560	72.155	
21	1.232000	3681.066	2987.877	202.171	0.046	3.050	993.756	74.296	
24	1.322000	3562.301	2694.628	201.716	0.044	3.210	982.818	76.961	
27	1.402000	3445.977	2457.899	201.281	0.044	3.374	970.613	80.237	
30	1.467000	3321.017	2263.814	200.882	0.043	3.541	956.997	84.189	
33	1.509000	3177.050	2105.400	200.538	0.043	3.715	941.805	88.952	
36	1.519000	3006.237	1979.087	200.277	0.042	3.902	924.854	94.751	
39	1.483000	2792.877	1883.260	200.137	0.041	4.108	905.942	101.893	
42	1.382000	1507.955	1091.134	200.041	0.014	2.495	899.129	85.436	
45	1.228000	1373.367	1118.372	200.039	0.014	2.605	892.060	88.758	
47	1.081000	816.060	754.912	200.017	0.006	1.775	890.000	79.849	

Рисунок А.7. Фрагмент окна программы расчета текущих параметров процесса прокатки кольца

Результаты расчета $n_1$ и $n_2$ на каждом обороте кольца на основе опытных данных сил прокатки $P$									
N об.	P, МН	$p_1$ , МПа	$p_2$ , МПа	$n_1$	$n_2$	L1, мм	L2, мм	s1, мм	s2, мм
1	0.370000	73.786967	46.264455	1.626360	1.019728	24.966197	39.818473	2.398543	0.432457
2	0.375000	80.618232	52.804966	1.722677	1.128354	23.062427	35.209797	2.031541	0.783459
3	0.380000	79.462748	54.352520	1.559636	1.066791	23.594410	34.494751	2.107798	1.179202
6	0.592000	108.002032	82.945566	1.545910	1.187259	26.780104	34.869924	2.550738	3.018262
9	0.521000	112.331588	96.155841	1.625324	1.391278	22.724755	26.547610	1.707223	2.351777
12	0.500000	118.159745	112.015447	1.700920	1.612472	20.784763	21.924854	1.332106	1.857894
15	0.448000	112.351669	117.182856	1.592923	1.661420	19.632361	18.822962	1.111952	1.502048
18	0.400000	104.829364	119.295847	1.452827	1.653317	18.830532	16.547036	0.959988	1.239012
21	0.400000	108.664188	133.874309	1.462594	1.801917	18.207728	14.778997	0.844811	1.038189
24	0.363000	101.900436	134.712463	1.324060	1.750408	17.659981	13.358525	0.750320	0.881680
27	0.300000	87.058047	122.055461	1.085012	1.521188	17.120186	12.211252	0.667748	0.760252
30	0.300000	90.333776	132.519705	1.072983	1.574066	16.532178	11.269373	0.591415	0.664585
33	0.300000	94.427213	142.490751	1.061555	1.601888	15.842635	10.498757	0.517391	0.589609
36	0.300000	99.792531	151.585031	1.053203	1.599817	15.010396	9.881750	0.443770	0.532230
39	0.295000	102.045318	151.333312	1.001496	1.485220	13.954790	9.409832	0.367521	0.490479
42	0.131000	86.872605	120.058589	1.016811	1.405240	7.538250	5.454565	0.105775	0.165225
45	0.125000	91.017155	111.769603	1.025453	1.259262	6.865499	5.590770	0.086574	0.174426
47	0.068000	83.327237	90.076782	1.043564	1.128093	4.079962	3.774246	0.030459	0.079541

Рисунок А.8. Фрагмент окна программы расчета коэффициентов напряженного состояния  $n_1$ ,  $n_2$

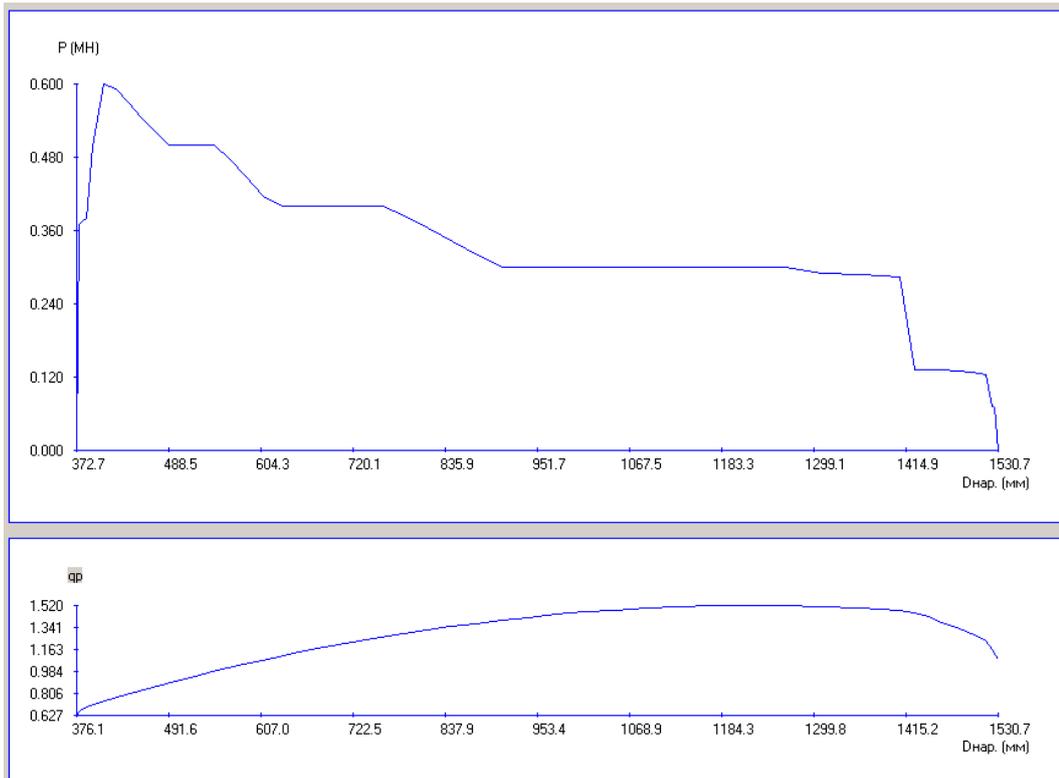


Рисунок А.9. Графические зависимости силы прокатки  $P$  коэффициента  $q_p$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$ , построенные на базе экспериментальной информации

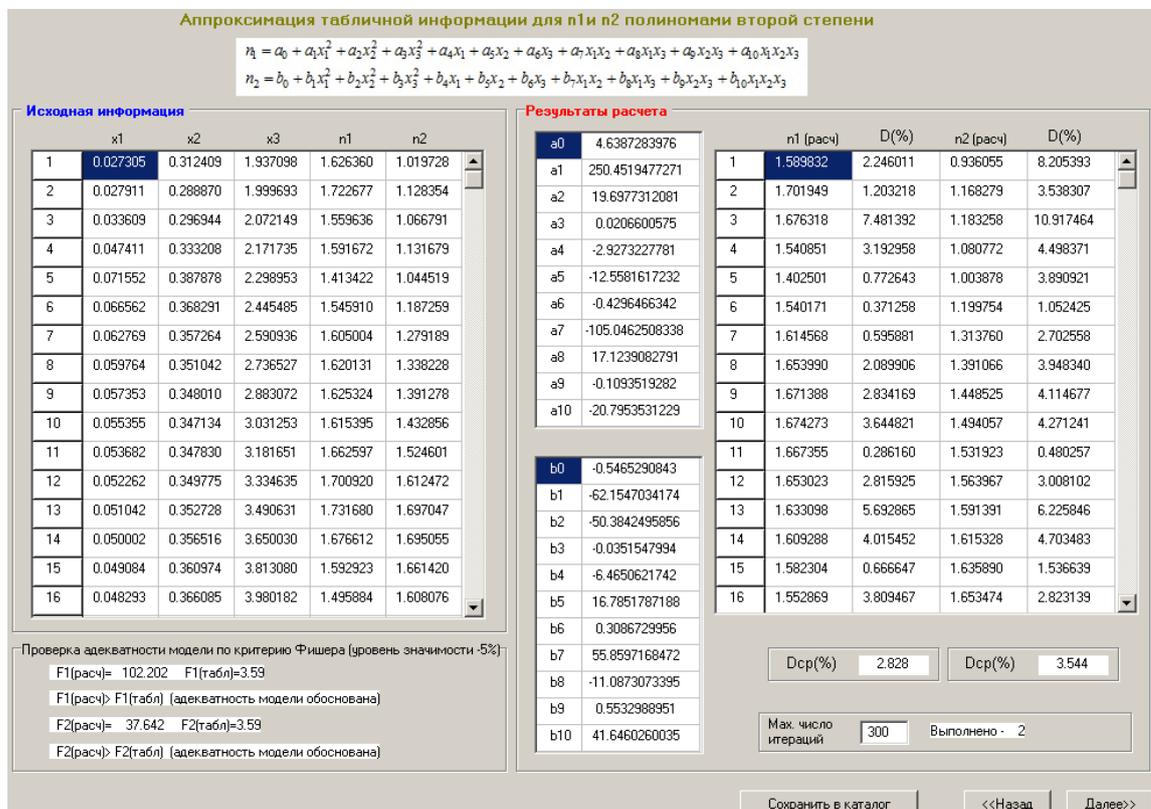
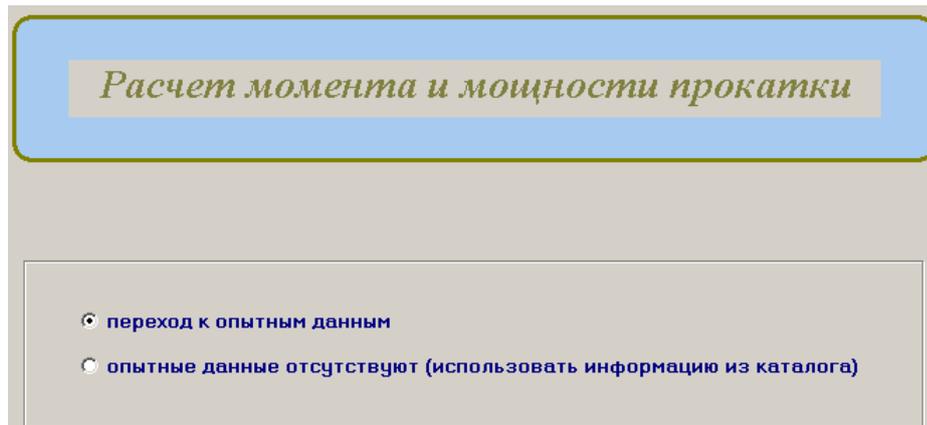


Рисунок А.10. Окно программы расчета констант эмпирических формул для коэффициентов напряженного состояния  $n_1$ ,  $n_2$



**Определение значений момента прокатки  $M$  на каждом обороте кольца на основе опытных данных**

**Задание значений  $M$**

таблица     график

N	t, с	M, МНм
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
(tk, Mk)		

**Таблица опытных значений  $M$**

Количество

N	t, с	M, МНм
1	0.976	0.032070
2	1.960	0.054312
3	2.955	0.079022
4	3.962	0.092193
5	4.989	0.103015
6	6.055	0.099014
7	7.160	0.093002
8	8.306	0.087137
9	9.494	0.082483
10	10.727	0.077605
11	12.006	0.073388
12	13.332	0.069336
13	14.707	0.066088
14	16.134	0.062934
15	17.613	0.059887
16	19.148	0.057194
17	20.740	0.054760
18	22.391	0.052304
19	24.103	0.050130
20	25.879	0.047874

**Результаты расчетов**

Количество оборотов

N	t, с	M, МНм
1	0.976	0.032070
2	1.960	0.054312
3	2.955	0.079022
4	3.962	0.092193
5	4.989	0.103015
6	6.055	0.099014
7	7.160	0.093002
8	8.306	0.087137
9	9.494	0.082483
10	10.727	0.077605
11	12.006	0.073388
12	13.332	0.069336
13	14.707	0.066088
14	16.134	0.062934
15	17.613	0.059887
16	19.148	0.057194
17	20.740	0.054760
18	22.391	0.052304
19	24.103	0.050130
20	25.879	0.047874

   <<Назад    Далее>>

Рисунок А.11. Окно программы интерполяции экспериментальных значений момента прокатки  $M$

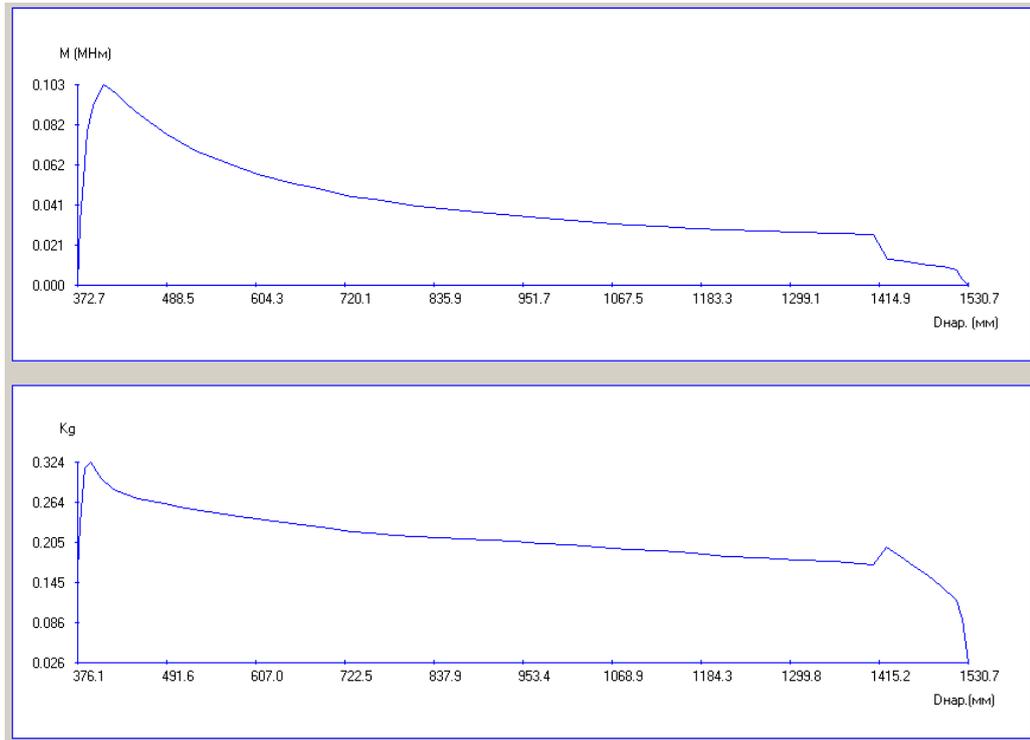


Рисунок А.12. Графические зависимости момента прокатки  $M$  коэффициента плеча силы прокатки  $K_g$  от текущих значений наружного диаметра кольца, построенные на базе экспериментальной информации

Аппроксимация табличной информации для коэффициента  $K_g$  полиномом второй степени

$$K_g = c_0 + c_1x_1^2 + c_2x_2^2 + c_3x_3^2 + c_4x_1 + c_5x_2 + c_6x_3 + c_7x_1x_2 + c_8x_1x_3 + c_9x_2x_3 + c_{10}x_1x_2x_3$$

**Исходная информация**

	x1	x2	x3	Kg
1	0.027305	0.318371	1.937098	0.160975
2	0.027911	0.283539	1.999693	0.233386
3	0.033609	0.294655	2.072149	0.314366
4	0.047411	0.333817	2.171735	0.323821
5	0.071552	0.388210	2.298953	0.298878
6	0.066562	0.368290	2.445485	0.284238
7	0.062769	0.357421	2.590936	0.275904
8	0.059764	0.351283	2.736527	0.269733
9	0.057353	0.348232	2.883072	0.266685
10	0.055355	0.347264	3.031253	0.261771
11	0.053682	0.347877	3.181651	0.257745
12	0.052262	0.349721	3.334635	0.253021
13	0.051042	0.352560	3.490631	0.250104
14	0.050002	0.356288	3.650030	0.246527
15	0.049084	0.360679	3.813080	0.242507
16	0.048293	0.365748	3.980182	0.239075

**Результаты расчета**

	Кг (расч)	D(%)
1	0.159164	1.125075
2	0.249578	6.937933
3	0.290839	7.484091
4	0.334127	3.182626
5	0.296683	0.734486
6	0.284424	0.085476
7	0.276774	0.315163
8	0.270884	0.426656
9	0.265777	0.340554
10	0.261220	0.210455
11	0.257017	0.282614
12	0.253090	0.027269
13	0.249388	0.286454
14	0.245813	0.289596
15	0.242408	0.040744
16	0.239079	0.001711

Средн. D(%)

Мах. число итераций  Выполнено - 2

Сохранить в каталог    <<Назад    Далее>>

Рисунок А.13. Окно программы расчета констант эмпирической формулы для коэффициента плеча силы прокатки  $K_g$

Кольцевая заготовка																	
Толщина, мм			105.101			Высота, мм			200.000			Внутр. диаметр, мм			162.500		
Готовое кольцо																	
Толщина, мм			18.600			Высота, мм			200.000			Наружн. диаметр, мм			1530.700		
Результаты расчета силы, момента и мощности прокатки в радиальном очаге на каждом обороте ( по ходу прокатки )																	
N об.	t,c	dt,c	Dнар,мм	P,МН	p1,МПа	p2,МПа	n1	n2	L1,мм	L2,мм	s1,мм	s2,мм					
1	0.976	0.976	376.115	0.351753	70.7384	39.5849	1.564117	0.875273	24.757831	41.263014	2.358542	0.472458					
2	1.960	0.985	379.872	0.384997	81.2970	56.6124	1.731776	1.205948	23.479518	33.717286	2.105903	0.709097					
3	2.955	0.995	384.758	0.418135	86.2263	61.1894	1.690304	1.199502	23.925769	33.715496	2.167593	1.119407					
6	6.055	1.065	422.049	0.594541	107.6013	83.8187	1.540174	1.199757	26.995193	34.654758	2.592003	2.976997					
9	9.494	1.189	470.891	0.539057	115.3731	100.0024	1.669480	1.447062	22.892511	26.411158	1.732567	2.326433					
12	13.332	1.326	525.384	0.485480	114.8656	108.6721	1.653463	1.564309	20.759920	21.943084	1.328920	1.861080					
15	17.613	1.480	586.183	0.443391	111.7795	115.5412	1.584617	1.637944	19.529829	18.893983	1.100358	1.513642					
18	22.391	1.651	654.019	0.408812	107.6666	121.4709	1.491951	1.683239	18.738206	16.608729	0.950591	1.248409					
21	27.721	1.842	729.704	0.379040	103.2539	126.5802	1.389659	1.703600	18.157715	14.811593	0.840173	1.042827					
24	33.667	2.055	814.148	0.352711	99.0508	130.8513	1.287016	1.700216	17.653104	13.362913	0.749735	0.882265					
27	40.302	2.293	908.365	0.329777	95.5259	134.3829	1.190623	1.674932	17.151218	12.191910	0.670171	0.757829					
30	47.705	2.558	1013.484	0.310438	93.2468	137.4311	1.107687	1.632555	16.572944	11.244726	0.594336	0.661664					
33	55.964	2.854	1130.769	0.295817	92.9863	140.6674	1.045414	1.581475	15.863780	10.486504	0.518773	0.588227					
36	65.180	3.185	1261.625	0.287884	95.8376	145.3682	1.011427	1.534152	14.998607	9.888189	0.443073	0.532927					
39	75.461	3.553	1407.625	0.289264	103.6522	153.5090	1.017228	1.506516	13.944015	9.415252	0.366953	0.491047					
42	86.654	3.776	1460.228	0.129569	86.0270	118.6555	1.006841	1.388718	7.529165	5.458764	0.105520	0.165480					
45	98.264	3.918	1514.796	0.129190	92.9373	116.2234	1.047877	1.310431	6.949025	5.556746	0.088693	0.172307					
47	106.216	3.986	1530.700	0.069326	83.6095	92.4084	1.048228	1.158540	4.145453	3.750801	0.031445	0.078555					

Рисунок А.14. Результаты расчета коэффициентов напряженного состояния  $n_1$ ,  $n_2$ , средних контактных давлений  $p_1$ ,  $p_2$  и силы прокатки  $P$  в радиальном очаге деформации

N об.	qr	F1,мм2	F2,мм2	вср,мм	sig,МПа	x1	x2	x3	Kg	M,МНм	N,МВт	Sg,МПа
1	0.600000	4972.5855	8287.6351	200.8490	45.2258	0.027305	0.318371	1.937098	0.159172	0.034000	0.102501	31.266933
2	0.696364	4735.6780	6800.5743	201.6940	46.9443	0.027911	0.283539	1.999693	0.249580	0.058081	0.175096	34.221956
3	0.709637	4849.2748	6833.4567	202.6800	51.0123	0.033609	0.294655	2.072149	0.290836	0.073107	0.220397	37.167556
6	0.778975	5525.4031	7093.1705	204.6810	69.8631	0.066562	0.368290	2.445485	0.284426	0.099080	0.298696	52.848089
9	0.866774	4672.2928	5390.4381	204.0970	69.1072	0.057353	0.348232	2.883072	0.265775	0.082202	0.247814	47.916178
12	0.946080	4226.5017	4467.3815	203.5895	69.4697	0.052262	0.349721	3.334635	0.253092	0.069356	0.209087	43.153778
15	1.033653	3966.6547	3837.5097	203.1075	70.5404	0.049084	0.360679	3.813080	0.242406	0.059862	0.180467	39.412533
18	1.128214	3797.0163	3365.5099	202.6350	72.1650	0.046971	0.377441	4.327542	0.232695	0.052390	0.157939	36.338844
21	1.225912	3670.9542	2994.4671	202.1705	74.3016	0.045515	0.398387	4.885883	0.223505	0.046208	0.139303	33.692444
24	1.321051	3560.9136	2695.5133	201.7160	76.9616	0.044472	0.422527	5.495900	0.214747	0.040969	0.123509	31.352089
27	1.406770	3452.2229	2454.0059	201.2815	80.2318	0.043752	0.449441	6.165957	0.206483	0.036561	0.110221	29.313511
30	1.473841	3329.2062	2258.8630	200.8820	84.1816	0.043183	0.478131	6.905535	0.199002	0.032956	0.099353	27.594489
33	1.512780	3181.2907	2102.9426	200.5380	88.9469	0.042655	0.507585	7.725926	0.192029	0.030130	0.090832	26.294844
36	1.516820	3003.8760	1980.3769	200.2770	94.7548	0.042115	0.536862	8.640823	0.184024	0.027956	0.084278	25.589689
39	1.481000	2790.7203	1884.3449	200.1375	101.8967	0.041453	0.564206	9.668011	0.170084	0.025843	0.077909	25.712356
42	1.379280	1506.1378	1091.9739	200.0405	85.4425	0.013786	0.330356	10.176294	0.171255	0.011639	0.035088	11.517244
45	1.250550	1390.0760	1111.5659	200.0390	88.6910	0.013787	0.330307	10.567021	0.115919	0.007844	0.023648	11.483556
47	1.105200	829.1590	750.2222	200.0165	79.7628	0.005897	0.211639	10.721871	0.051475	0.001868	0.005633	6.162311

Рисунок А.15. Результаты расчета коэффициента плеча силы прокатки  $K_g$ , момента  $M$ , мощности прокатки  $N$  и напряжений в валке-оправке  $S_g$  в радиальном очаге деформации

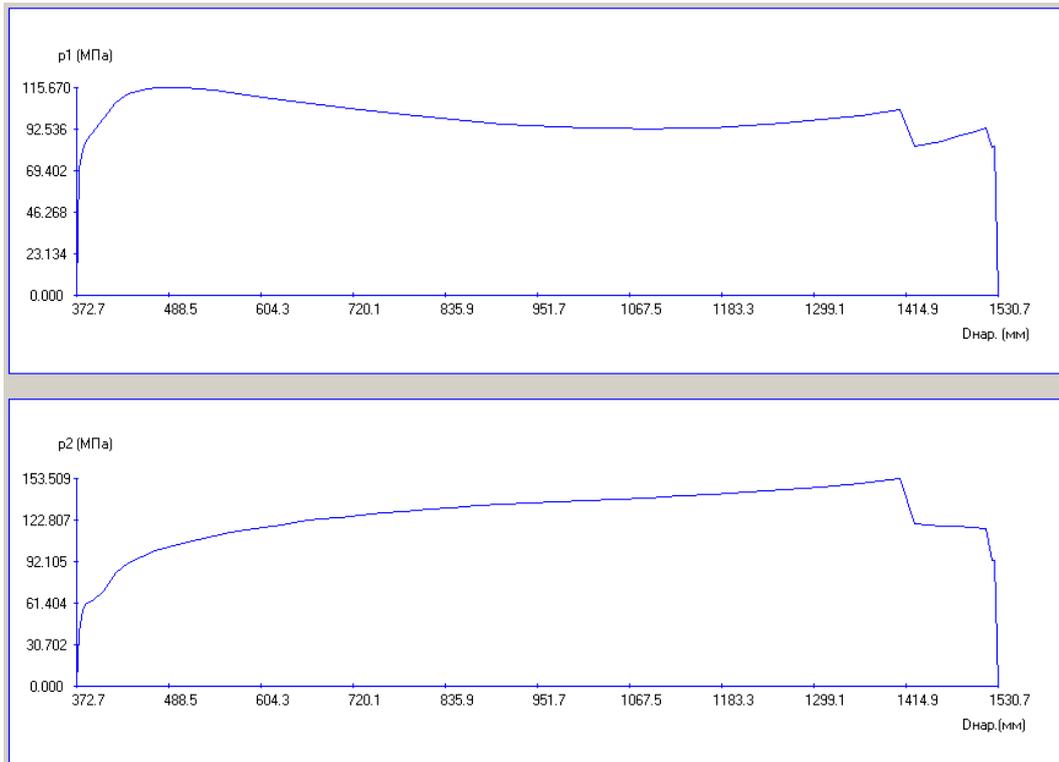


Рисунок А.16. Расчетные графические зависимости средних давлений в зоне контакта металла с главным валком  $p_1$  и валком-оправкой  $p_2$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

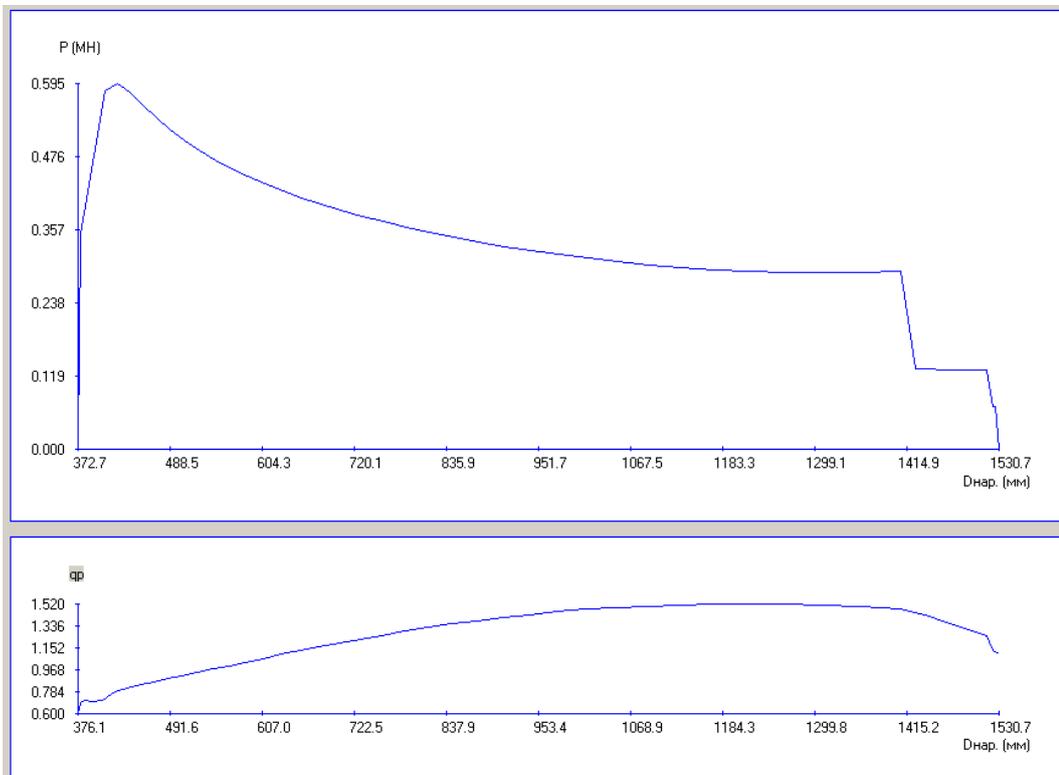


Рисунок А.17. Расчетные графические зависимости силы прокатки  $P$  и коэффициента  $q = L_1 / L_2 = n_2 / n_1$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

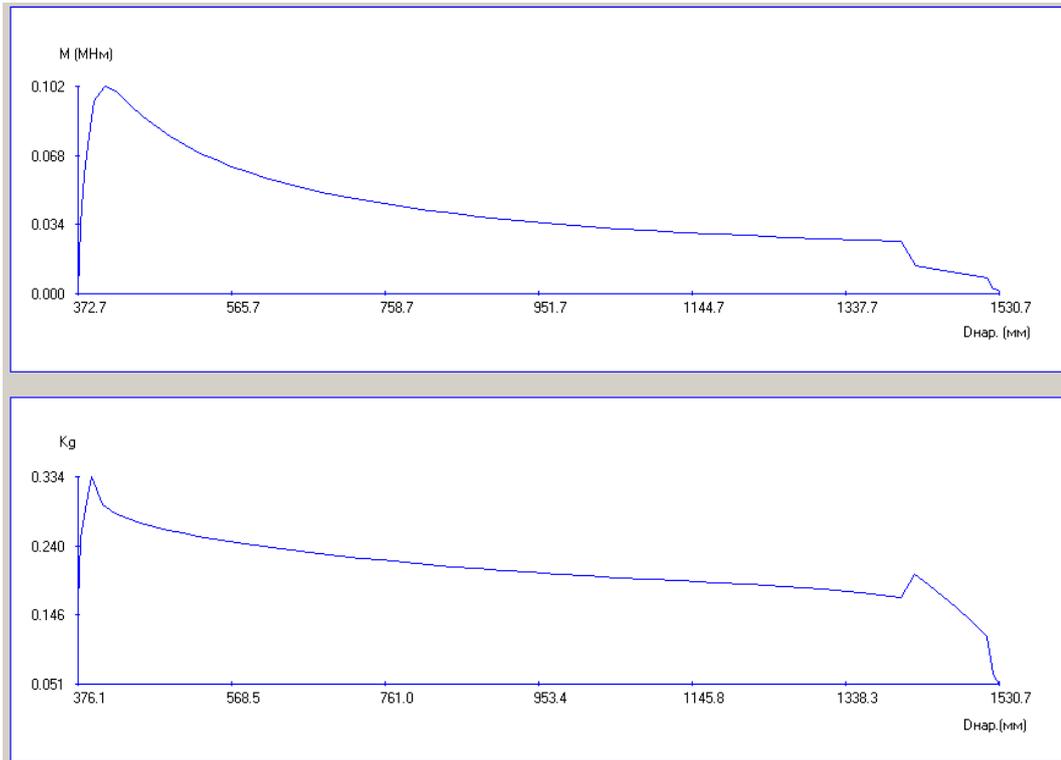


Рисунок А.18. Расчетные графические зависимости момента прокатки  $M$  и коэффициента плеча силы прокатки  $K_g$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

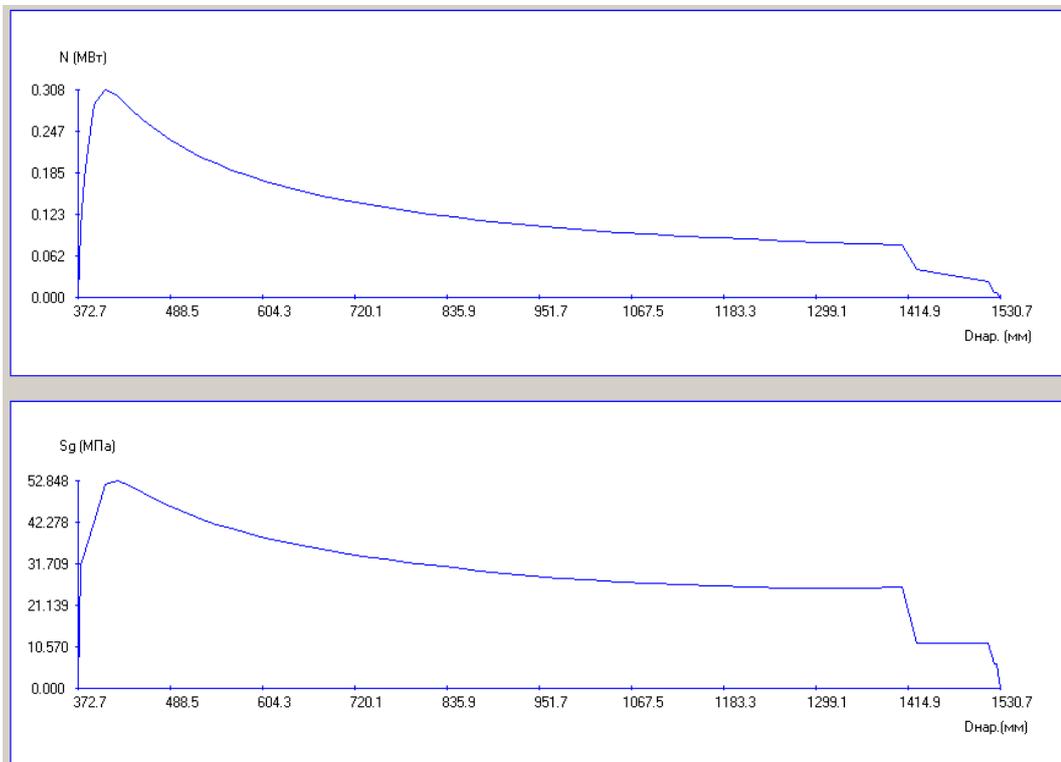


Рисунок А.19. Расчетные графические зависимости мощности прокатки  $M$  и напряжений в валке-оправке  $S_g$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

Приложение Б. Окна программы расчета режима обжатий металла при прокатке валка колесопрокатного стана, выполненного по соответствующему приведенному прямоугольному сечению на базе аналитической модели

Материал кольца	Сталь 60
Химический состав материала кольца (%)	
C (0.05 - 1.1)	0.58
Si (0 - 1.65)	0.25
Mn (0.03 - 1.55)	0.7
Cr (0 - 0.3)	0.1
Ni (0 - 0.3)	0.1
P (0 - 0.05)	0.01
S (0 - 0.05)	0.01
V (0 - 0.26)	0
Cu (0 - 0.28)	0

1) Диаметр приводного валка, мм	1100
2) Диаметр валка-оправки, мм	250
3) Диаметр шейки валка-оправки, мм	240
4) Длина шейки валка-оправки, мм	120
5) Диаметр наклонного валка, мм	300
6) Линейная скорость вращения приводного валка, м/с	1.2
7) Высота исходной кольцевой заготовки, мм	350
8) Внутренний диаметр исходной кольцевой заготовки, мм	260
9) Высота готового кольца, мм	350
10) Толщина готового кольца, мм	233
11) Наружный диаметр готового кольца, мм	860
12) Температура начала прокатки, град.С	1100
13) Температура конца прокатки, град.С	1000

1) Допустимая сила прокатки в радиальном очаге, МН	1.6
2) Допустимая сила прокатки в осевом очаге, МН	1.2
3) Допустимая мощность прокатки,квт	500
4) Предел прочности стали валка-оправки, МПа	700
5) Допустимая скорость перемещения валка-оправки, мм/с	10
6) Количество оборотов на 1-ом этапе прокатки	4
7) Скорость роста диаметра кольца в конце 1-го этапа прокатки, мм/с	2.29299
8) Коэффициент для точки 3 (начало 3-го этапа прокатки)	0.97
9) Коэффициент для точки 4 (начало 4-го этапа прокатки)	0.99
10) Допустимая скорость роста диаметра кольца на 2-ом этапе прокатки, мм/с	2.7
11) Допустимая скорость роста диаметра кольца на 3-ем этапе прокатки, мм/с	2
12) Скорость роста диаметра кольца на 4-ом этапе прокатки, мм/с	1.6
13) Доля обжатия по высоте от уширения (0 - 1)	1
14) Точность приближения к заданной скорости роста диаметра на 2-ом этапе прокатки, мм/с	0.0001
15) Точность приближения к заданной скорости роста диаметра на 3-ем этапе прокатки, мм/с	0.0001
16) Точность приближения к заданной скорости роста диаметра на 4-ом этапе прокатки, мм/с	0.0001
17) Начальное обжатие в итерационном процессе, мм	0.7

Рисунок Б.1. Исходная информация

Кольцевая заготовка											
		Толщина, мм	273.721	Высота, мм	350.000	Внутр. диаметр, мм		250.000			
Готовое кольцо											
		Толщина, мм	233.000	Высота, мм	350.000	Наружн. диаметр, мм		860.000			
N об.	t,с	dL,с	(h+dh),мм	h,мм	(b+db),мм	b,мм	Dнар,мм	Dвн,мм	VDн,мм/с	VDвн,мм/с	Vопр,мм/с
1	2.114	2.114	273.721	271.329	350.718	350.718	808.655	265.997	0.573	2.837	1.132
2	4.231	2.117	271.329	268.853	351.461	351.461	809.981	272.276	0.627	2.966	1.170
3	6.351	2.121	268.853	265.838	352.365	352.365	811.699	280.024	0.810	3.653	1.422
4	8.476	2.125	265.838	261.559	353.649	353.649	814.336	291.218	1.241	5.268	2.014
5	10.608	2.132	262.407	259.013	354.667	351.840	820.092	302.066	2.700	5.088	1.592
6	12.755	2.147	259.728	255.798	353.023	350.639	825.889	314.314	2.700	5.705	1.835
7	14.918	2.162	256.361	251.928	351.969	350.057	831.727	327.872	2.700	6.271	2.051
8	17.095	2.177	252.263	248.727	351.117	350.000	836.082	338.627	2.000	4.940	1.624
9	19.284	2.189	249.038	245.582	351.037	350.000	840.459	349.296	2.000	4.874	1.579
10	21.484	2.200	245.881	242.552	350.999	350.000	844.860	359.755	2.000	4.754	1.513
11	23.696	2.212	242.841	239.629	350.964	350.000	849.283	370.024	2.000	4.643	1.452
12	25.919	2.223	239.854	237.361	350.748	350.000	852.841	378.118	1.600	3.640	1.121
13	28.152	2.233	237.580	235.153	350.728	350.000	856.413	386.108	1.600	3.578	1.087
14	30.394	2.242	235.366	233.000	350.710	350.000	860.000	394.000	1.600	3.520	1.055

Рисунок Б.2. Окно компьютерной программы расчета текущих параметров процесса прокатки кольца

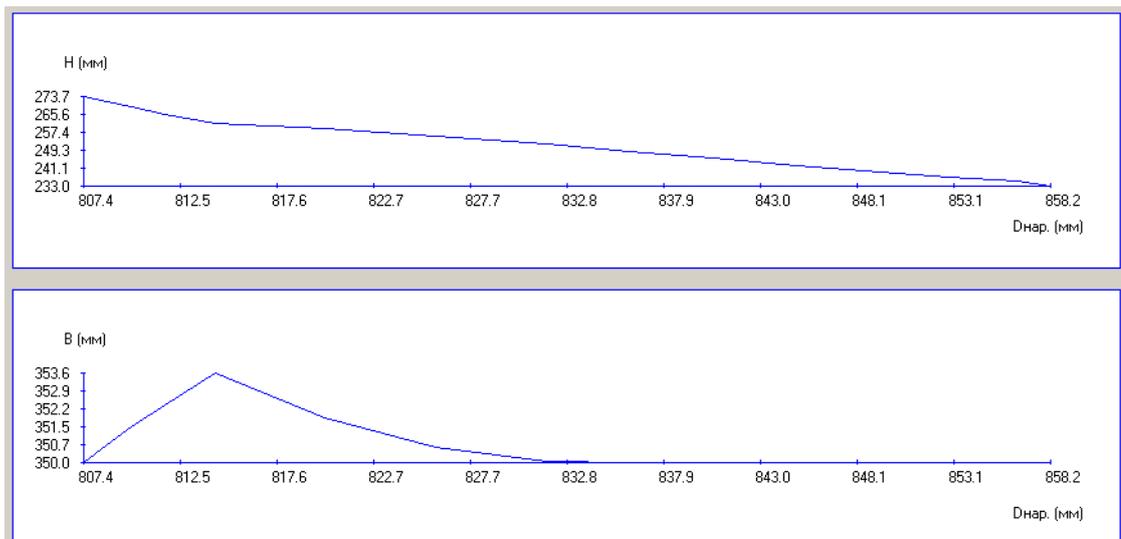


Рисунок Б.3. Зависимость толщины  $H$  и высоты  $B$  в радиальном очаге деформации от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

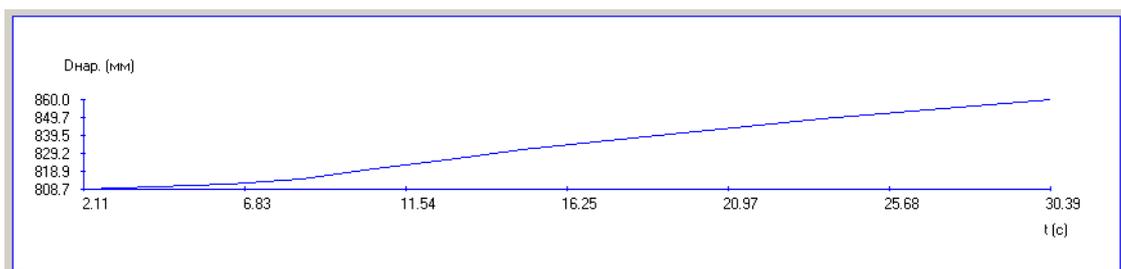


Рисунок Б.4. Зависимость наружного диаметра кольца  $D_{нар}$  от времени  $t$

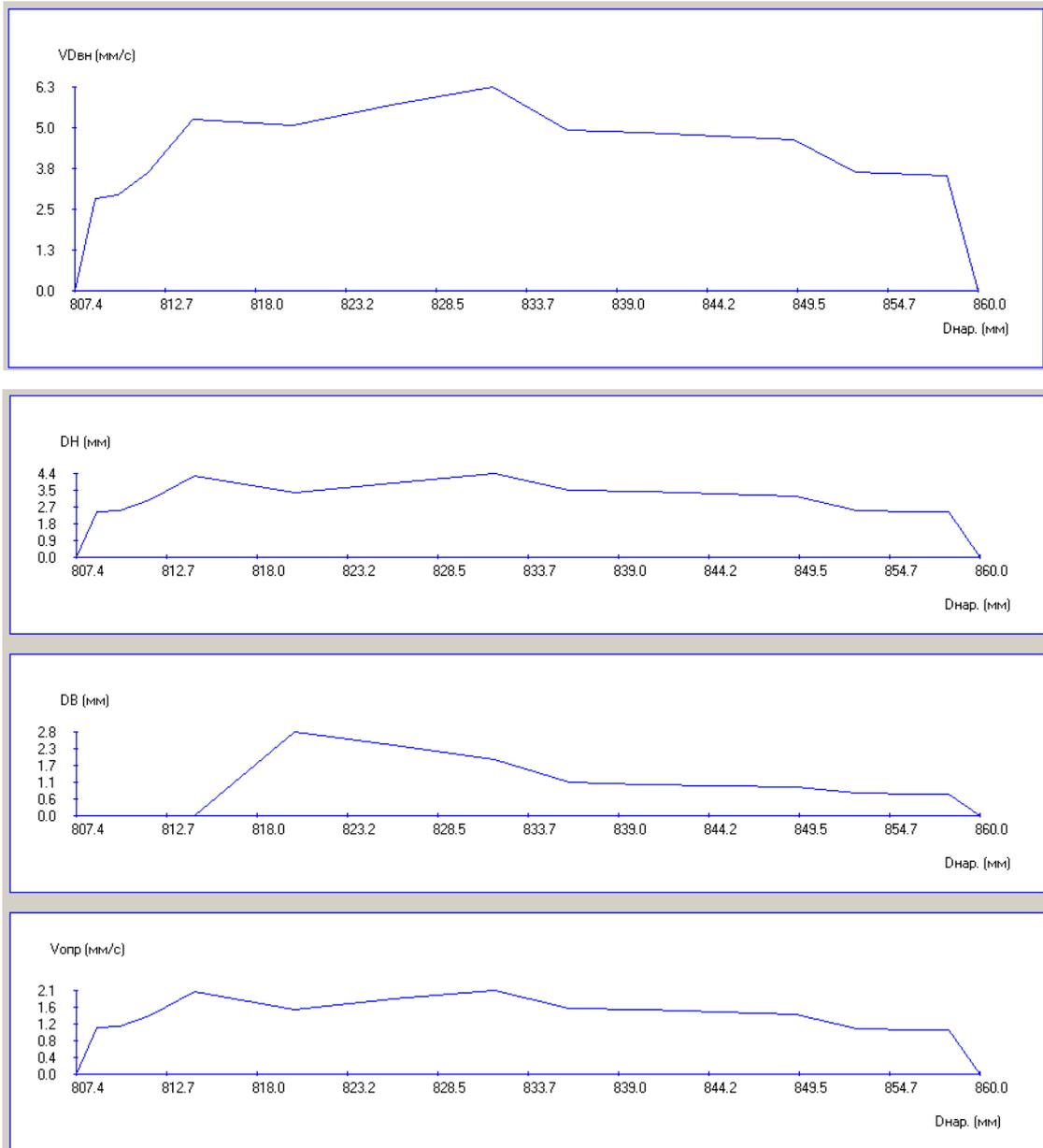


Рисунок Б.5. Зависимость скорости роста внутреннего диаметра кольца  $V_{Двн}$ , обжатий  $DH$  и  $DB$  в радиальном и осевом очагах деформации соответственно, скорости движения валка-оправки  $V_{опр}$  в радиальном очаге деформации от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

*Расчет сил прокатки*

переход к опытным данным

опытные данные отсутствуют (использовать информацию из каталога)

Диапазоны изменения параметров  $x_1=L_1/(H/h)$ ,  $x_2=(L_1+L_2)/(H+h)$ ,  $x_3=(B+b)/(H+h)$  в процессе прокатки кольца

Шифр кольца: Валок КПС

$x_{1min}$  0.008777   
  $x_{1max}$  0.017443   
  $x_{2min}$  0.105427   
  $x_{2max}$  0.177214   
  $x_{3min}$  1.286320   
  $x_{3max}$  1.496074

Выберите из каталога строку с подходящими диапазонами изменения параметров  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$

Каталог

Шифр кольца	$x_{1min}$	$x_{1max}$	$x_{2min}$	$x_{2max}$	$x_{3min}$	$x_{3max}$	$a_0$
Кольцо №2	0.005865	0.071552	0.210512	0.564336	1.937098	10.721871	4.638728
Кольцо №3	0.007677	0.289222	0.128557	0.448940	1.010166	2.638431	-203.707351

Коэффициенты для полиномов аппроксимации величин  $n_1$  и  $n_2$ , соответствующие кольцу, выбранному из каталога

Шифр кольца	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
Кольцо №2	4.638728	250.451948	19.697731	0.020660	-2.927323	-12.558162	-0.429647

Рисунок Б.6. Окно программы выбора из каталога констант эмпирических формул для расчета коэффициентов напряженного состояния  $n_1$ ,  $n_2$

**Расчет момента и мощности прокатки**

переход к опытным данным  
 опытные данные отсутствуют (использовать информацию из каталога)

**Диапазоны изменения параметров  $x_1=L_1/(H+h)$ ,  $x_2=(L_1+L_2)/(H+h)$ ,  $x_3=(B+b)/(H+h)$  в процессе прокатки кольца**

Шифр кольца: Валок КПС

$x_{1min}$  0.008777     $x_{1max}$  0.017443     $x_{2min}$  0.105427     $x_{2max}$  0.177214     $x_{3min}$  1.286920     $x_{3max}$  1.496074

Выберите из каталога строку с подходящими диапазонами изменения параметров  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$

**Каталог**

Шифр кольца	$x_{1min}$	$x_{1max}$	$x_{2min}$	$x_{2max}$	$x_{3min}$	$x_{3max}$	$c_0$
Кольцо №2	0.005865	0.071552	0.211639	0.564206	1.937098	10.721871	-0.121928
Кольцо №3	0.007677	0.289222	0.128557	0.448940	1.010166	2.638431	-25.794700

**Коэффициенты для полинома аппроксимации коэффициента  $K_g$ , соответствующие кольцу, выбранному из каталога**

Шифр кольца	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$
Кольцо №2	-0.121928	-332.484686	-12.590013	-0.021203	15.861562	0.605805	0.162757

Рисунок Б.7. Окно программы выбора из каталога констант эмпирических формул для расчета коэффициентов плеча силы прокатки  $K_g$

Кольцевая заготовка																	
Толщина, мм			273.721			Высота, мм			350.000			Внутр. диаметр, мм			260.000		
Готовое кольцо																	
Толщина, мм			233.000			Высота, мм			350.000			Наружн. диаметр, мм			860.000		

Результаты расчета силы, момента и мощности прокатки в радиальном очаге на каждом обороте ( по ходу прокатки )

N об.	t,c	dt,c	Dнар,мм	P,МН	p1,МПа	p2,МПа	n1	n2	L1,мм	L2,мм	s1,мм	s2,мм
1	2.114	2.114	808.655	0.508182	51.4403	24.9500	2.607810	1.264858	28.168091	58.075304	1.704164	0.687836
2	4.231	2.117	809.981	0.509724	54.4843	25.8202	2.643712	1.252861	26.618668	56.169100	1.520242	0.955758
3	6.351	2.121	811.699	0.586939	59.7517	29.0563	2.599717	1.264200	27.877254	57.327213	1.665504	1.349496
4	8.476	2.125	814.336	0.770706	68.1827	35.4362	2.475644	1.286650	31.962599	61.499288	2.185987	2.093013
5	10.608	2.132	820.092	0.638174	71.6877	33.4167	2.660907	1.240362	25.200420	54.061668	1.352742	2.041258
6	12.755	2.147	825.889	0.729464	80.0764	37.8320	2.636065	1.245407	25.891985	54.803751	1.422312	2.517688
7	14.918	2.162	831.727	0.816440	88.6211	42.2295	2.619896	1.248425	26.246043	55.078913	1.455637	2.977363
8	17.095	2.177	836.082	0.676160	91.4852	39.3462	2.766794	1.189949	21.083267	49.021488	0.936233	2.599767
9	19.284	2.189	840.459	0.672547	96.8749	40.5529	2.800895	1.172487	19.806177	47.314028	0.823748	2.632252
10	21.484	2.200	844.860	0.662467	102.2345	41.5240	2.837387	1.152446	18.487546	45.517324	0.715551	2.613449
11	23.696	2.212	849.283	0.655586	107.7890	42.6017	2.868973	1.133910	17.353593	43.907348	0.628576	2.583424
12	25.919	2.223	852.841	0.525039	110.1185	38.5137	2.994836	1.047438	13.608168	38.908486	0.385564	2.107436
13	28.152	2.233	856.413	0.523087	114.9538	39.4100	3.013374	1.033085	12.987677	37.883388	0.350373	2.076627
14	30.394	2.242	860.000	0.522817	119.9784	40.3955	3.029695	1.020069	12.437657	36.940973	0.320566	2.045434

Рисунок Б.8. Результаты расчета коэффициентов напряженного состояния  $n_1$ ,  $n_2$ , средних контактных давлений  $p_1$ ,  $p_2$  и силы прокатки  $P$  в радиальном очаге деформации

Кольцевая заготовка																	
Толщина, мм			273.721			Высота, мм			350.000			Внутр. диаметр, мм			260.000		
Готовое кольцо																	
Толщина, мм			233.000			Высота, мм			350.000			Наружн. диаметр, мм			860.000		

Результаты расчета силы, момента и мощности прокатки в радиальном очаге на каждом обороте ( по ходу прокатки )

N об.	qr	F1,мм2	F2,мм2	вср,мм	sig,МПа	x1	x2	x3	Kg	M,МНм	N,МВт	Sg,МПа
1	0.485027	9879.0565	20368.0544	350.7180	19.7255	0.008777	0.158230	1.286920	0.134263	0.064568	0.150414	11.028255
2	0.473902	9355.4237	19741.2480	351.4610	20.6090	0.009167	0.153259	1.301269	0.148585	0.071485	0.166527	11.061719
3	0.486283	9822.9685	20200.1033	352.3650	22.9839	0.011278	0.159353	1.318014	0.171624	0.094773	0.220778	12.737391
4	0.519723	11303.5413	21749.1618	353.6490	27.5414	0.016227	0.177214	1.341111	0.215284	0.155394	0.361999	16.725391
5	0.466142	8902.1364	19097.4733	353.2535	26.9411	0.013018	0.152012	1.354967	0.203212	0.121127	0.282171	13.849262
6	0.472449	9109.6030	19281.6585	351.8310	30.3773	0.015286	0.156534	1.364966	0.224009	0.152097	0.354316	15.830382
7	0.476517	9212.7023	19333.4146	351.0130	33.8262	0.017443	0.159997	1.381155	0.242821	0.183762	0.428083	17.717882
8	0.430082	7390.9183	17184.8995	350.5585	33.0654	0.014116	0.139932	1.399463	0.223509	0.139601	0.325207	14.673611
9	0.418611	6942.4315	16584.4422	350.5185	34.5871	0.013975	0.135701	1.417324	0.224657	0.139093	0.324024	14.595204
10	0.406165	6479.8757	15953.7992	350.4995	36.0312	0.013632	0.131041	1.435200	0.224001	0.136158	0.317187	14.376454
11	0.395232	6082.1220	15388.7352	350.4820	37.5706	0.013315	0.126974	1.452865	0.223215	0.133844	0.311796	14.227127
12	0.349748	4767.9483	13632.5217	350.3740	36.7695	0.010448	0.110048	1.468412	0.204709	0.098061	0.228437	11.394076
13	0.342833	4550.4145	13272.9755	350.3640	38.1479	0.010268	0.107611	1.482291	0.204374	0.097300	0.226665	11.351714
14	0.336690	4357.5954	12942.4546	350.3550	39.6008	0.010103	0.105427	1.496074	0.204089	0.096885	0.225698	11.345855

Рисунок Б.9. Результаты расчета коэффициента плеча силы прокатки  $K_g$ , момента  $M$ , мощности прокатки  $N$  и напряжений в валке-оправке  $S_g$  в радиальном очаге деформации

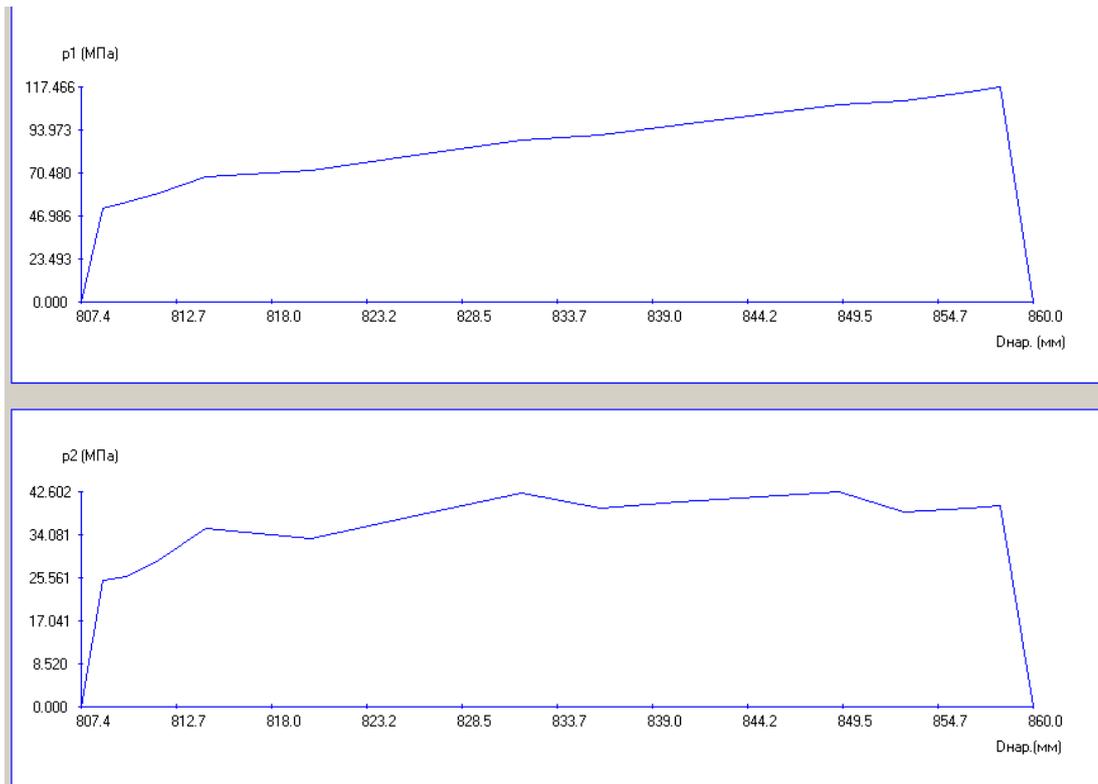


Рисунок Б.10. Расчетные графические зависимости средних давлений в зоне контакта металла с главным валком  $p_1$  и валком-оправкой  $p_2$  от текущих значений наружного диаметра кольца

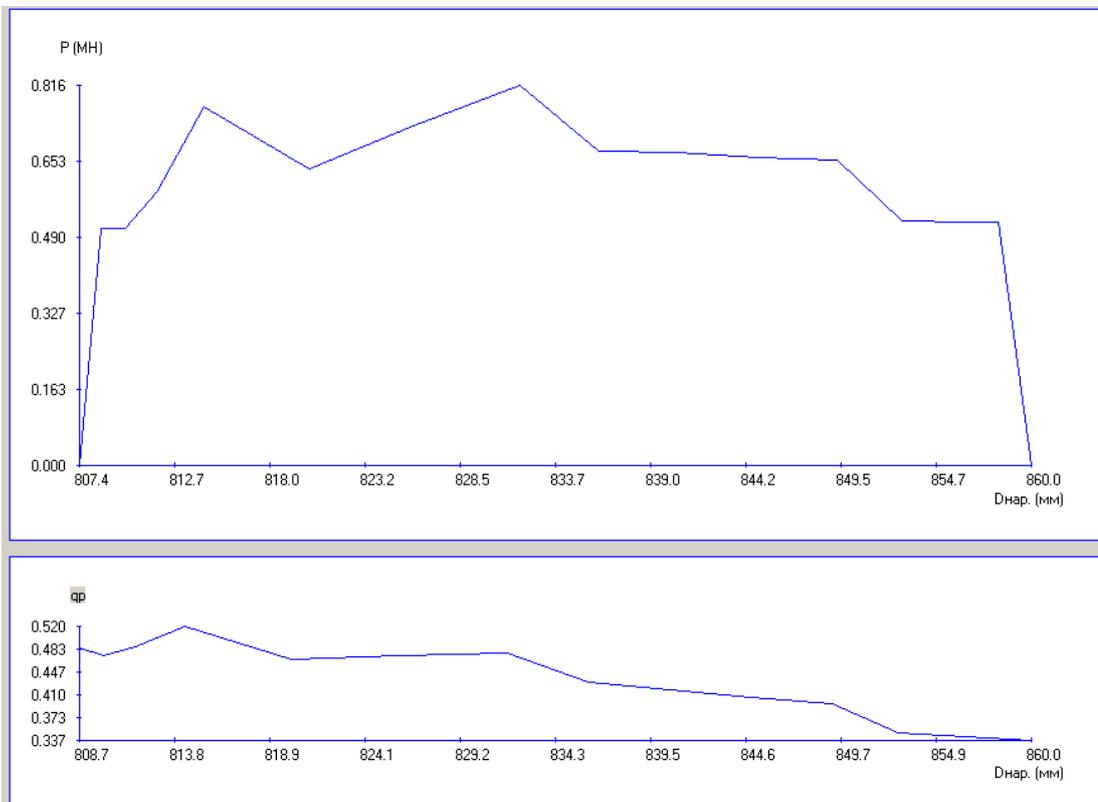


Рисунок Б.11. Расчетные графические зависимости силы прокатки  $P$  и коэффициента  $q = L_1 / L_2 = n_2 / n_1$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

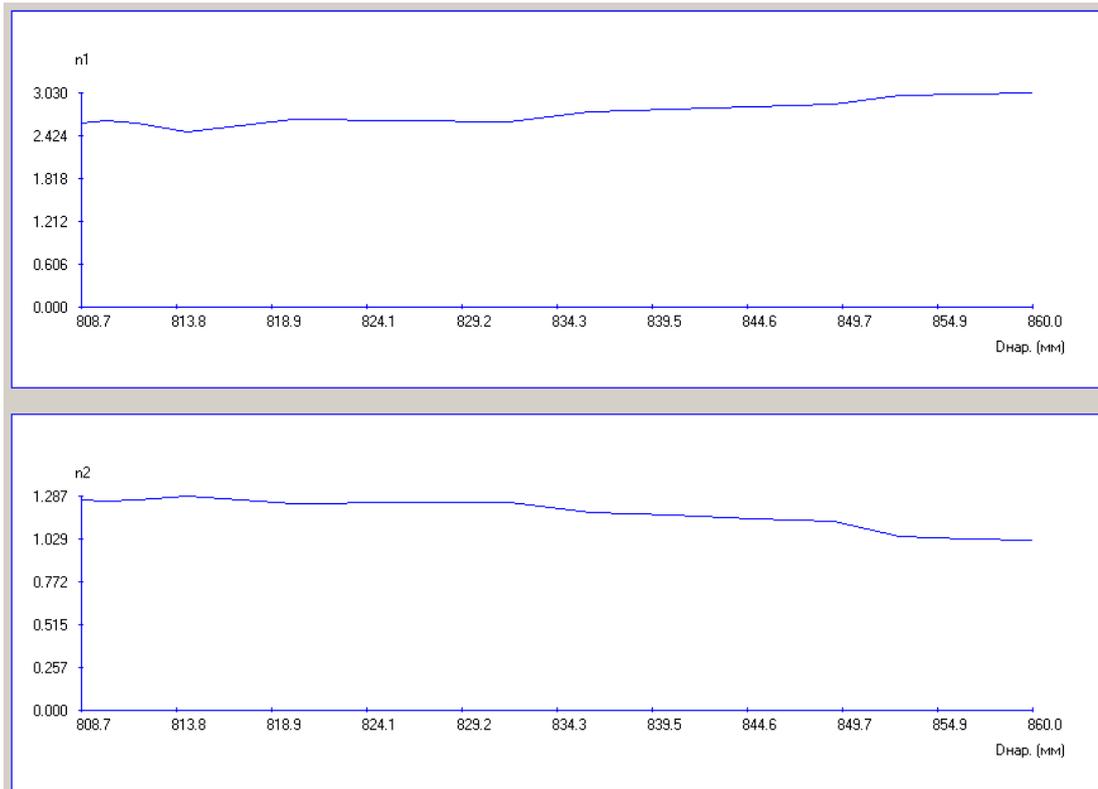


Рисунок Б.12. Расчетные графические зависимости коэффициентов напряженного состояния  $n_1$ ,  $n_2$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

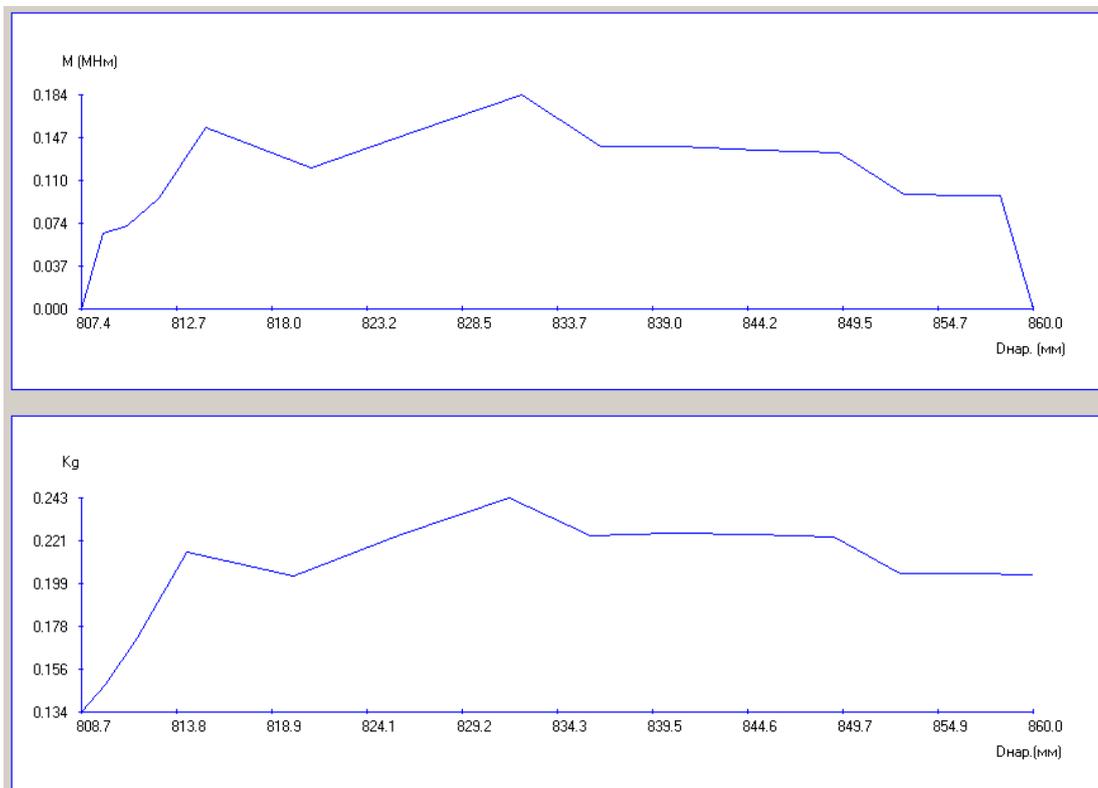


Рисунок Б.13. Расчетные графические зависимости момента прокатки  $M$  и коэффициента плеча силы прокатки  $K_g$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

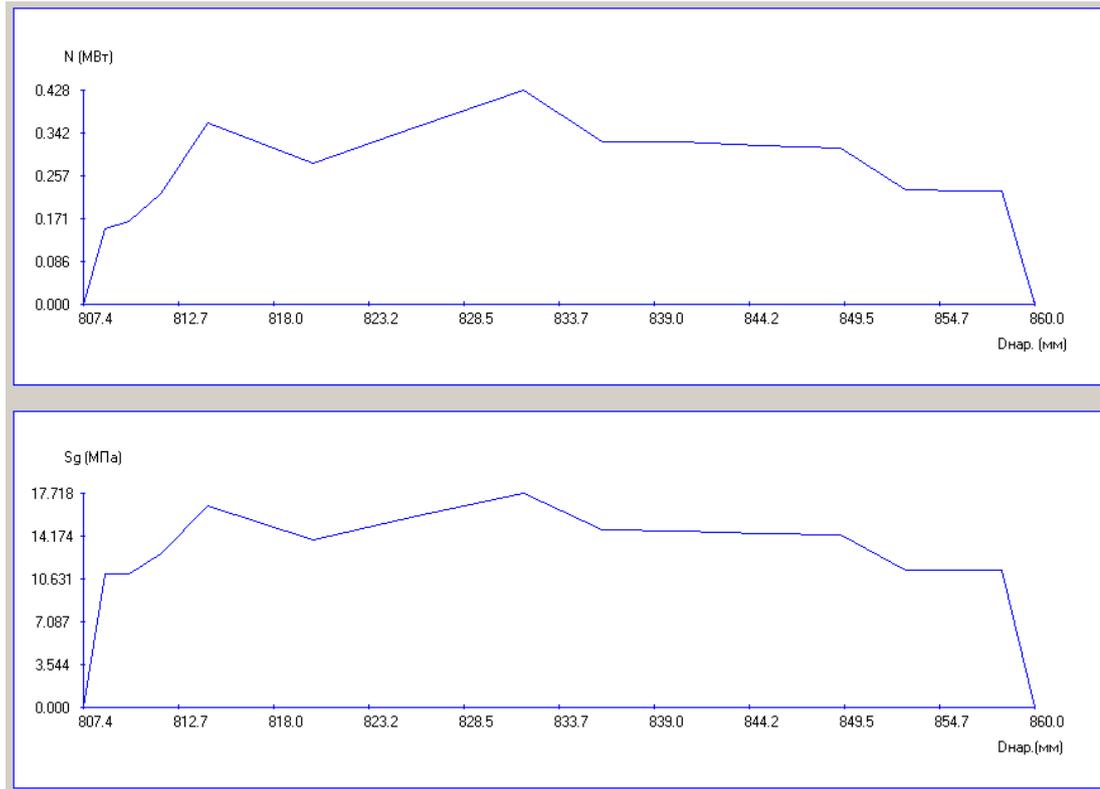


Рисунок Б.14. Расчетные графические зависимости мощности прокатки  $M$  и напряжений в валке-оправке  $S_g$  от текущих значений наружного диаметра кольца  $D_{нар}$

Приложение В. Документы, подтверждающие эффективность использования  
результатов работы



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78  
эл. почта: donntu.info@mail.ru

*DI 10.2024 № 30-12/160*

На № \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.019.03 при  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Пилипенко Виктора Владиславовича на тему «**Развитие теории и технологии прокатки колец с наружным гребнем**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.05 - Обработка металлов давлением (технические науки), в учебный процесс кафедры «Обработка металлов давлением» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Результаты диссертационных исследований Пилипенко Виктора Владиславовича, включающие: усовершенствованный метод конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане и методику автоматизированного проектирования контуров сечений чистовых механически обработанных и черновых фланцев, а также калибровок для штамповки заготовок с гребнем и прокатки фланцев на кольцепрокатном стане, внедрены в учебный процесс в качестве учебного материала дисциплин «Компьютерное моделирование и оптимизация процессов ОМД» и «Теория и технология кузнечно-штамповочного производства» для проведения лекций и практических занятий.

Проректор по научно-педагогической работе  
д-р. техн. наук, профессор

А.Б. Бирюков

Начальник учебного отдела  
канд. техн. наук, доцент

Б.В. Гавриленко

Заведующий кафедрой  
«Обработка металлов давлением»  
д-р. техн. наук, доцент

С.А. Снитко



*Соответствует оригиналу  
Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.019.03*

*А.В. Яковенко*



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78  
эл. почта: donntu.info@mail.ru

*01.10.2020 № 20-12/159*  
На № \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.019.03 при  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Пилипенко Виктора Владиславовича на тему «**Развитие теории и технологии прокатки колец с наружным гребнем**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.05 - Обработка металлов давлением (технические науки), в научно-исследовательскую работу кафедры «Обработка металлов давлением» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

При выполнении на кафедре «Обработка металлов давлением» научно-исследовательской работы «Разработка и совершенствование ресурсосберегающих технологий обработки металлом давлением» (2019 – 2020 гг.), в выполнении которой Пилипенко Виктор Владиславович принимает участие в качестве исполнителя, были использованы, разработанные в диссертационной работе материалы:

- автоматизированное проектирование нового экономичного профиля фланца с наружным гребнем, необходимого для изготовления путем его механической обработки главного вала колесопрокатного стана, а также разработка усовершенствованной технологии прокатки фланца на радиально-осевом кольцепрокатном стане;
- математическая модель процесса прокатки прямоугольных в сечении колец, учитывающая уширение металла в радиальном и осевом очагах деформации;
- усовершенствованный метод конечно-элементного моделирования процесса прокатки колец на радиально-осевом кольцепрокатном стане.

Проректор по научной работе  
д-р. техн. наук, профессор



С.В. Борщевский

Начальник научно-исследовательской части  
д-р. техн. наук, доцент

К.Н. Лабинский

Заведующий кафедрой  
«Обработка металлов давлением»  
д-р. техн. наук, доцент

С.А. Снитко



*Соответствует оригиналу  
Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.019.03*  
\_\_\_\_\_ *С.В. Яковенко*

## СПРАВКА

о передаче результатов научно-технической разработки, полученной в процессе выполнения кандидатской диссертации Пилипенко Виктора Владиславовича «Развитие теории и технологии прокатки колец с наружным гребнем» (научный руководитель д-р техн. наук Снитко Сергей Александрович)

**Краткое описание научно-технической разработки.**

Переданы материалы по проектированию контура сечения фланца, являющегося новым профилем для изготовления из него путем механической обработки главного валка колесопрокатного стана, а также материалы по технологии его прокатки, которые изложены в статьях:

1. Разработка калибровки для прокатки главного валка колесопрокатного 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.

2. 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.

Главный валок колесопрокатного стана является ответственным инструментом деформации, который формирует поверхность катания обода железнодорожного колеса при его прокатке. Замена литого валка на катаный направлена на уменьшение его стоимости и увеличение срока службы.

Начальник управления по стратегии и инвестициям  
Дирекции по технологии и развитию  
Дивизиона железнодорожных колес АО «ВМЗ»

  
(подпись)

12.10.2020 Роман Анатольевич Голышков



Соответствует оригиналу  
Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.

 – А.В. Яковченко

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе

ГОУВПО «ДОННТУ»

д-р техн. наук, профессор



*[Signature]* С.В. Борщевский

15 » октября 2020 г.

### Расчет

ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения результатов научно-технической разработки, полученной в процессе выполнения кандидатской диссертации аспиранта кафедры «Обработка металлов давлением» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Пилипенко Виктора Владиславовича «Развитие теории и технологии прокатки колец с наружным гребнем»

В диссертации представлены материалы по проектированию контура сечения фланца с наружным гребнем, являющегося новым профилем для изготовления из него путем механической обработки главного валка колесопрокатного стана. Также приведены результаты разработки калибровки и режимов деформации металла для прокатки главного валка колесопрокатного стана на кольцепрокатном стане.

Промышленное внедрение разработки, связанной с заменой предварительно обточенных литых заготовок главных валков колесопрокатного стана на цельнокатаные, обеспечит уменьшение их цены и увеличение срока службы.

Расчет выполнен на основе данных, представленных в таблице.

*Соответствует ориенталу  
Ученый секретарь  
диссертационного совета*



*[Signature]* А.В. Яковенко





# РУСПОЛИМЕТ

(ПАО «Русполимет»)

607018, Россия  
Нижегородская область  
г. Кулебаки, ул. Восстания, 1  
Факс: +7 (83176) 5-44-60, 7-90-69  
Тел.: +7 (83176) 7-90-00, 7-93-52, 5-12-57  
E-mail: ruspolymet@ruspolymet.ru

ОГРН 1055214499966  
ИНН/КПП 5251008501/525101001

№ 83-01/1-29 от 12.11.2020  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

ГОУВПО «ДОННТУ»  
ГОУВПО "ДОНЕЦКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ"  
Снитко С.А.  
83001, Донецк г, Артема ул, дом  
№ 58

## АКТ

передачи результатов научно-технических разработок, полученных в результате выполнения диссертационной работы Пилипенко Виктора Владиславовича «Развитие теории и технологии прокатки колец с наружным гребнем» на соискание ученой степени кандидата технических наук (научный руководитель: д-р. техн. наук, доцент Снитко С.А.) для рассмотрения возможности использования их в производстве ПАО «Русполимет».

### Краткое описание переданных научно-технических разработок.

Заводу передан усовершенствованный метод конечно-элементного моделирования процесса прокатки кольцевых заготовок на радиально-осевом кольцепрокатном стане. Сущность метода заключается в следующем:

- определение напряжения течения металла при конечно-элементном моделировании процесса прокатки кольцевых заготовок выполнено на базе зависимости, учитывающей накопленную деформацию и процессы динамической рекристаллизации металла при горячей прокатке;

- предложен усовершенствованный метод выполнения расчетов параметров процесса прокатки кольцевых заготовок 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.

Выполненные, на базе усовершенствованного метода конечно-элементного моделирования расчеты процессов прокатки прямоугольного в сечении кольца типа «втулка» и кольца с наружным гребнем (фланец), показывают, что качественный ход расчетных значений наружного диаметра кольца и скорости его роста, а также силы прокатки и температуры кольца соответствуют экспериментальным данным. Средние относительные отклонения расчетных значений от экспериментальных не превышают 15%.

ПАО «Русполимет»

Форма И 3.5.4-8013.01

*Соответствует оригиналу*  
*Ученой секретарь*  
*диссертационного совета Д 019.03*



*А.В. Яковенко*

Предложенный подход может позволить проводить оценку эффективности новых технических решений (калибровок и режимов деформации) не прибегая к опытным прокаткам.

Директор центра научно-технического и инновационного развития ПАО «Русполимет», профессор, д.т.н.



Рябцев А.Д.

*Соответствует оригиналу  
Ученой секретарь  
диссертационного совета Д01.019.03*



*А. В. Яковенко*