

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Институт новых материалов и технологий  
Кафедра «Обработка металлов давлением»

На правах рукописи

Пузырев Сергей Сергеевич

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

2.6.4. Обработка металлов давлением

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Шварц Данил Леонидович,  
доктор технических наук,  
доцент

Екатеринбург – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ И ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	10
1.1. Современное состояние способов производства железнодорожных колес.....	10
1.2. Обзор технологических схем деформации заготовок на прессопрокатных линиях .....	18
1.3. Современные методы моделирования процессов деформации .....	25
1.4. Выводы по разделу и постановка задач исследования .....	32
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВКИ .....	35
2.1. Постановка краевой задачи .....	35
2.2. Анализ действующей технологической схемы предварительной и окончательной штамповки .....	43
2.3. Анализ альтернативных схем предварительной штамповки .....	50
2.4. Анализ влияния геометрических параметров поковки на положение нейтрального сечения .....	60
2.5. Выводы по разделу .....	66
3. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ СПОСОБА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ШТАМПОВКИ С РАЗГОНКОЙ МЕТАЛЛА .....	67
3.1. Подготовка и проведение прокатки опытной партии заготовок .....	67
3.2. Исследование и анализ результатов опытной партии .....	69
3.3. Выводы по разделу .....	79
4. ВНЕДРЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ КОЛЕСОБАНДАЖНОГО ЦЕХА .....	81
4.1. Основные понятия и принципы статистического контроля процессов производства .....	82

4.2. Внедрение системы статистического контроля процессов производства в условиях колесобандажного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК» .....	87
4.3. Выводы по разделу .....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ П1 .....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ П2 .....	125

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Для обеспечения растущего спроса на железнодорожные перевозки, в соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [1], проведения модернизации подвижного состава с продлением эксплуатационного ресурса и улучшения технико-экономических характеристик железнодорожной продукции, требуется решить актуальную проблему отечественного производства цельнокатаных железнодорожных колес – повышение их точности и надежности.

Одним из основных направлений развития металлургического комплекса страны является снижение расхода металла, материальных и энергетических затрат в сфере производства. Решение этих задач при производстве железнодорожных колес требует поиска новых технических и технологических решений по всей цепочке производства.

Поэтому **актуальной** научно-технической задачей является совершенствование существующих и разработка новых технологических схем обработки заготовок давлением при производстве железнодорожных колес, обеспечивающих равномерное течение металла по периметру поковки, что позволяет снизить энергосиловые затраты на производство и обеспечить высокую точность размеров чернового колеса.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам производства цельнокатаных железнодорожных колес и разработки технологических схем и режимов деформации металла посвящены работы Г.А. Бибика, А.М. Иоффе, А.В. Праздников, М.И. Староселецкого, М.Ю. Шифрина и других ученых. Однако практически все изложенные труды применимы только к производству колес на прессопрокатных линиях, пущенных в эксплуатацию в 80-х годах прошлого века.

В работах А.В. Кушнарера, А.В. Яковченко, С.А. Снитко, А.В. Фомина рассмотрены вопросы производства железнодорожных колес на современных прессопрокатных линиях, также представлены результаты использования современных компьютерных программ для моделирования процессов горячего

деформирования при производстве колес. Однако отсутствуют теоретические данные по оптимальным геометрическим соотношениям поковки, которые обеспечивают рациональные потоки течения металла. Оценка влияния выбора технологических схем и режимов деформации на точность черновых колес в настоящее время мало изучена, используемые компьютерные модели для исследования режимов горячего деформирования не адаптированы к условиям промышленного производства.

Развитие науки и техники приводит к непрерывному совершенствованию технологии производства железнодорожных колес. На прессопрокатных линиях изменяется как состав оборудования, так и появляются новые типы конструкций. Внедрены системы управления, способные осуществлять более детальные настройки технологического процесса, реализованы полностью автоматизированные производственные линии, в связи с чем требуется совершенствование и адаптация под данные нововведения существующих теоретических положений, а также технологических схем и режимов деформации металла при производстве железнодорожных колес.

**Целью диссертационной работы** является совершенствование технологии производства цельнокатаных железнодорожных колес на основе компьютерного моделирования.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить ряд научно-технических **задач**, а именно:

- определить начальные и граничные условия для создания компьютерной модели при моделировании процессов деформации, адаптированную для условий промышленного производства;
- оценить влияние технологических факторов на точность колес в зависимости от калибровки инструмента и режимов деформации;
- определить оптимальные соотношения геометрических параметров поковки, обеспечивающие рациональные потоки металла при штамповке;
- разработать, исследовать и провести промышленное опробование способа предварительной штамповки совмещающего процессы осадки и разгонки;

- выполнить анализ уровня бракованной продукции по видам дефектов, разработать и внедрить систему статистического контроля процесса производства.

**Научная новизна и теоретическая ценность работы** состоит в

- определении закономерностей течения металла в зависимости от технологической схемы, калибровки инструмента и режимов деформации, а также в уточнении начальных и граничных условий для процессов предварительной и окончательной штамповки, выполненных на основе промышленного эксперимента со штыревой моделью и компьютерного моделирования;

- определении значения показателя трения для условий контактного взаимодействия заготовки с инструментом деформации в операциях предварительной и окончательной штамповки при наличии графитовой технологической смазки;

- анализе влияния геометрических параметров поковки на положение нейтрального сечения и в определении оптимальных соотношений геометрических параметров поковки, обеспечивающих рациональные потоки металла при окончательной штамповке.

**Практическая значимость работы** состоит в промышленной апробации способа предварительной штамповки колесной заготовки, совмещающего процессы осадки и разгонки металла, обеспечивающего повышение точности черновых колес и снижения энергосиловых параметров работы оборудования, а также внедрения системы статистического контроля процесса производства, направленной на снижение уровня несоответствующей продукции.

**Методология и методы исследования** построены на основных концепциях механики обработки металлов давлением, на методах конечно-элементного моделирования процессов штамповки железнодорожных колес в программном комплексе Deform-3D, на методах математической статистики, на методах планирования вычислительных и промышленных экспериментов, а также на методах статистической обработки опытных данных.

**Положения выносимые на защиту:**

- закономерности формоизменения заготовок при предварительной и окончательной штамповке в зависимости от калибровки штампов;
- значение показателя трения для условий контактного взаимодействия заготовки с инструментом деформации в операциях предварительной и окончательной штамповки при наличии графитовой технологической смазки;
- влияние геометрических параметров штампованной поковки после операции предварительной штамповки на положение нейтрального сечения во время операции окончательной штамповки;
- рекомендации по выбору оптимального соотношения геометрических параметров заготовки, для создания условия равномерного радиального течения металла по периметру заготовки;
- результаты промышленной апробации способа предварительной штамповки заготовки, совмещающего процессы осадки и разгонки металла, с целью повышения точности чернового колеса и снижения энергосиловых параметров.
- результат внедрения статистического управления процессом (SPC) и его адаптация к процессу производства железнодорожных колес.

**Личное участие автора** состоит: в постановке задач для компьютерного моделирования и исследовании технологических операций предварительной и окончательной штамповки по различным схемам; в планировании, подготовке и проведении промышленного эксперимента со штыревой моделью и промышленной апробации способа предварительной штамповки с осуществлением разгонки; в обработке и анализе результатов компьютерного моделирования и промышленного эксперимента; в определении оптимальных значений корректировок контролируемых параметров и разработке модели последовательных действий для случаев выхода контролируемого параметра за граничные пределы при реализации системы статистического контроля; в формировании основных положений и выводов по работе.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** обеспечивается использованием современных методов компьютерного моделирования технологических процессов, а также согласованностью результатов компьютерного моделирования с результатами промышленных экспериментов, проводимых при опробовании способа предварительной штамповки.

**Апробация результатов работы** выполнена путем докладов результатов исследований на конференциях, публикацией в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, а также в зарубежных изданиях.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Региональная научно-практическая конференция студентов «Молодежь и наука» (2012 г., Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил), VI международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении» (2012 г., УрФУ, г. Екатеринбург), X Всероссийская научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии» (2013 г., Старооскольский технологический институт Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Старый Оскол), XV international scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production enegineering (2014 г., Ченстоховский политехнический университет, г. Ченстохова (Польша), Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», посвященная памяти чл.-корр. РАН, почетного доктора УрФУ В. Л. Колмогорова (2014 г., УрФУ, г. Екатеринбург), XII международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии» (2015 г., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург), V Международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии» (2015 г., УрФУ, г. Екатеринбург), XXII Международная научно-практическая конференция «Трубы – 2016» (2016 г., ОАО

«РосНИТИ», г. Челябинск), 45-ая Научно-техническая конференция молодых специалистов АО «ЕВРАЗ НТМК» (2019 г., АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», г. Нижний Тагил), XI Конференция молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (2020 г., ГНЦ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И. П. Бардина», г. Москва).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 печатных трудах, в том числе 4 из них опубликованы в изданиях, определенных ВАК Российской Федерации. Три статьи вошли в международную базу Scopus, одна в международную базу Web of Science.

# 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ И ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Современное состояние способов производства железнодорожных колес

Железнодорожные колеса, используемые в различных странах, несмотря на отличия, вызванные конструкцией вагонов и локомотивов, сложившимся производством и условиями эксплуатации, имеют три основных элемента конструкции: ступицу, диск и обод. Поверхность обода, которая контактирует с рельсом, называется поверхностью катания колеса. Принято различать внутреннюю поверхность колеса, расположенную со стороны гребня, и наружную сторону.

Металлургические заводы, специализирующиеся на производстве железнодорожных колес, используют два основных способа изготовления колес: производство литьем и методами обработки металлов давлением (ОМД), а именно штамповкой, либо совмещением процессов штамповки и прокатки. Стоит отметить, что колеса, произведенные вторым способом, получили название - цельнокатаные [3, 4].

В настоящее время, основным поставщиком и потребителем колес, произведенных методом литья, являются страны Северной Америки, а крупнейшим производителем является компания Amsted Rail (США) [5].

Литые железнодорожные колеса используются в основном для грузовых вагонов, однако они менее надежны по сравнению с колесами, произведенными методами ОМД [6].

Технология производства литых колес заключается в выплавке в электродуговой печи колесной стали и последующей разливке стали под давлением сжатого воздуха в формы, выполненных из графита, которые обеспечивают требуемые геометрические параметры железнодорожного колеса [7]. Далее колеса подвергаются операциям термообработки и последующей механической обработки, для обеспечения требуемых чистовых размеров колеса.

Технология производства железнодорожных колес методами обработки металлов давлением включает общую для всех производителей технологическую схему: выплавка стали (в конвертере, либо электродуговой печи), получение и резка слитка на заготовки, нагрев и удаление окалины, штамповка (либо штамповка, совмещенная с прокаткой) черного колеса на прессопрокатной линии, термообработка (закалка и отпуск), механическая обработка и контроль качества продукции [3, 4, 8-11].

Технологические схемы и режимы горячей деформации при производстве железнодорожных колёс, используемые на различных предприятиях, отличаются, как правило, рядом особенностей, связанных со специфическими условиями, присущими каждому из этих предприятий. Вместе с тем можно выделить и общие элементы технологических схем, применяемых на практике. Принципиально в производстве колёс существуют два способа, использующих либо штамповку и прокатку, либо только штамповку [3].

Технологические схемы производства железнодорожных колес, использующих только штамповку (рисунок 1.1), позволяют снизить расходный коэффициент металла, устранить образование дефектов прокатного производства (закаты, плены), сократить количество технологических операций и соответственно агрегатов в производственной линии [3, 12-16, 39].

Данный способ производства имеет свои недостатки, основным из которых является потребность в оборудовании, способном развивать большие усилия для обеспечения формирования геометрических параметров железнодорожных колес, которое весьма дорогостоящее. Помимо этого, другой проблемой является низкая стойкость инструмента для деформации, что связано с высокими контактными давлениями на рабочих поверхностях штампов.

В связи с перечисленными недостатками, данный способ производства железнодорожных колес не реализован в промышленных масштабах.

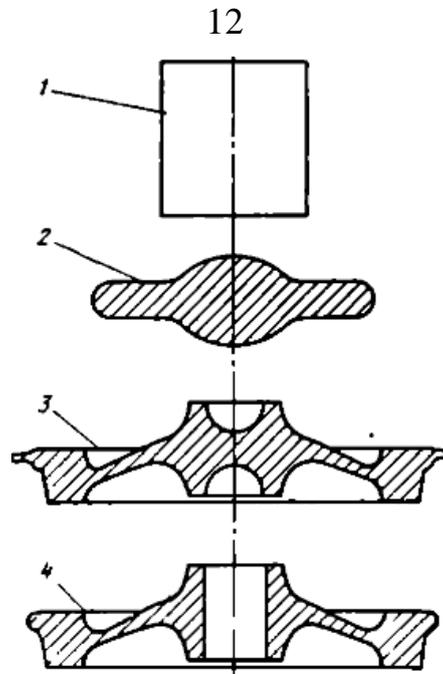


Рисунок 1.1 – Схема производства штампованных колес на заводе фирмы «Chambersburg» США: 1 - заготовка, 2 - заготовка после осадки и раздачи, 3 - заготовка после формовки, 4 - заготовка после прошивки отверстия

Другим способом изготовления железнодорожных колес, с использованием только метода штамповки, является применение сферодвижной штамповки (секционная штамповка, прокатка в штампах) [3, 12, 15, 17-24]. Особенностью сферодвижной штамповки является вращение нижнего штампа и колебательное движение верхнего штампа за счет того, что ось его отклонена на угол  $\beta$  относительно оси нижнего штампа. Преимуществами технологии является повышение точности размеров чернового колеса, а также снижение силовых параметров процесса. Однако использование данного способа изготовления находится на стадии исследований и разработок и не применяются в массовом производстве железнодорожных колес, что в первую очередь связано со сложной кинематикой движения инструмента деформации, как следствие высокой стоимостью технологического оборудования, и низкой производительностью технологической линии [3, 12, 15, 17-22] (рисунок 1.2).

Наибольшее распространение в мире получил способ изготовления железнодорожных колес, совмещающий в себе процессы штамповки и прокатки заготовки в колесопрокатном стане.



Рисунок 1.2 – Общая схема сферодвижной штамповки (а) и реализация процесса на прессе (б)

В настоящее время железнодорожные колеса, производимые этим способом, выпускают предприятия более чем в 25 странах мира: Surahammar Bruks AB (Швеция), KLV-Wheelco SA (Швейцария), BVV (Bohumer Verein Verkehrstechnik, Бохум, Германия), Lucchini Sidermeccanica, (Италия), CAF (Construccionesy Auxiliar de Ferrocarriles (Испания), GHH-Bonatrans (Чехия), Taylor Bros and Co (Великобритания), Sumitomo Metal Industries & Nippon Steel (Япония), Masteel (Китай), Steel Authority of India Limited - (Индия), Comstell (Австралия), MWL Brasilia (Бразилия), Standart Steel (США), Kardemir (Турция), ТОО «Проммашкомплект» (Казахстан), ПАО «Интерпайп НТЗ» (Украина), АО «ЕВРАЗ НТМК» (Россия), АО «ВМЗ» (Россия), и др. [3,5,10, 25-27].

Принципиальная схема формообразования цельнокатаного железнодорожного колеса состоит из следующих технологических операций: предварительная осадка; штамповка в кольце; разгонка металла пуансоном для требуемого распределения его между отдельными элементами колеса; окончательная штамповка для формовки ступицы и прилегающей к нему части диска окончательно, а обода и другой части диска предварительно; прокатка обода и прилегающей к нему части диска на стане; выгибка диска и калибровка геометрической формы и размеров колеса; прошивка отверстия в ступице (рисунок 1.3).

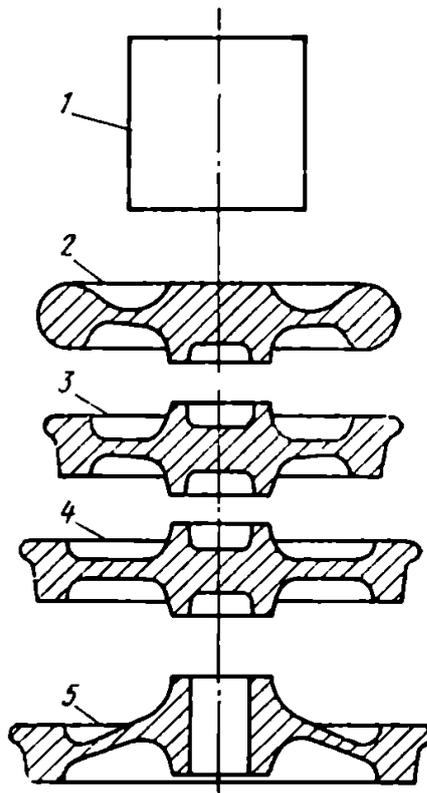


Рисунок 1.3 – Схема формоизменения заготовки при производстве цельнокатаного железнодорожного колеса: 1 – заготовка; 2 – заготовка после предварительной штамповки; 3 – заготовка после окончательной штамповки; 4 – заготовка после прокатки; 5 – заготовка после выгибки диска, калибровки колеса и прошивки отверстия

Для осуществления перечисленных процессов применяют несколько гидравлических прессов и колесопрокатный стан. Число гидравлических прессов зависит от развиваемых ими усилий и требуемой производительности линии. Более мощные прессы позволяют совмещать некоторые из перечисленных операций [3, 12].

Отличия в технологических схемах различных предприятий состоят, прежде всего, в количестве прессов и их мощности, в распределении операций горячего деформирования между ними, а также в выборе момента, когда прошивается отверстие в ступице, и типе применяемого колесопрокатного стана [3, 12].

На современных предприятиях, технологические операции, предшествующие прокатке заготовки на колесопрокатном стане, выполняются на

гидравлических прессах, количество которых составляет от одного до трех.

Использование одного пресса сокращает затраты на оборудование, однако снижается производительность всей линии. При использовании в составе линии одного пресса, как правило, его усилие составляет не менее 100 МН, на нем совмещают выполнение операций предварительной штамповки, разгонки и окончательной штамповки [28-30]. Для выполнения указанных операций пресс оборудуют двумя подвижными столами – предварительную штамповку заготовки с одновременной разгонкой металла центральной зоны выполняют на первом столе, за первый ход траверзы, после чего заготовку перемещают на второй стол, для выполнения окончательной штамповки с образованием ступицы и примыкающей к ней части диска. Таким образом, применение в составе линии одного пресса требует повышенного контроля за соблюдением технологической точности при работе подвижных столов, для обеспечения точности параметров размеров заготовки.

При наличии в составе прессопрокатной линии трех прессов, каждая технологическая операция выполняется на отдельном агрегате, имеющих разное усилие [3, 8, 14, 31-36]. Данная технология имеет преимущество, так как в процессе работы столы не имеют горизонтальных перемещений, заготовка укладывается на нижние столы прессов и снимается с них после завершения деформации специальными механизмами – манипуляторами. Это облегчает настройку прессов, обеспечивает повышение точности размеров колеса и повышение производительности всей линии.

Стоит отметить, что некоторые заводы используют технологическую схему, в которой осуществляется прошивка отверстия в заготовке на начальных технологических этапах производства колеса. В первую очередь это связано с типом используемого колесопрокатного стана, в данном случае отверстие служит для обеспечения фиксации колеса на оси во время прокатки на стане.

Использование колесопрокатного стана при производстве железнодорожных колес обеспечивает преимущество при формировании профиля поверхности обода колеса, в частности круга катания, снижая при этом требуемое усилие деформации

в 3-4 раза [3, 4, 12].

Задачей колесопрокатного стана является раскатка обода колесной заготовки, придание прокатываемым элементам требуемой конфигурации, а также упрочнение этих элементов. Для осуществления этой задачи колесопрокатные станы имеют многовалковую систему и мощные приводы, позволяющие создавать при высоких скоростях прокатки большие давления со стороны валков на обрабатываемое изделие.

Деформация колесных заготовок в современных станах представляет собой непрерывную прокатку замкнутого круга – обода колесной заготовки – между рабочими валками разной конфигурации, расположенными в различных местах по окружности обода.

В мировой практике используют несколько типов колесопрокатных станов, которые различаются по положению колеса во время прокатки – станы горизонтального (рисунок 1.4) и вертикального типа (рисунок 1.5).

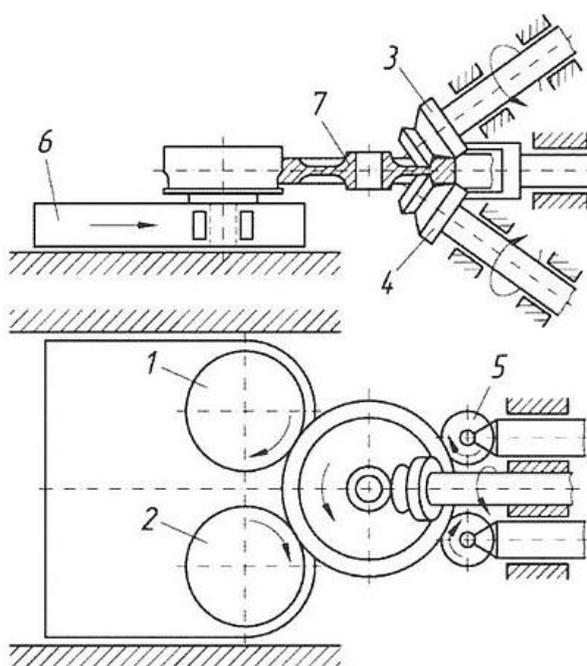


Рисунок 1.4 – Схема прокатки на колесопрокатном стане горизонтального типа: 1,2 – коренные рабочие валки; 3,4 – наклонные рабочие валки; 5 – ролики; 6 – каретка; 7 – заготовка колеса [3]

В настоящее время на предприятиях в большинстве случаев используются станы вертикального типа [2, 6, 13, 16, 25, 28-30]. В стане с вертикальным расположением колеса последнее либо насаживается на ось [60], перемещающуюся во время прокатки, либо удерживается в требуемом положении направляющими роликами. При этом раскатка обода по диаметру проводится двумя эджерными валками, а расстояние, определяющее ширину обода, фиксируется парой валков, расположенных по обе стороны колеса в другом его сечении, формирование поверхности катания колеса определяется нажимным валком.

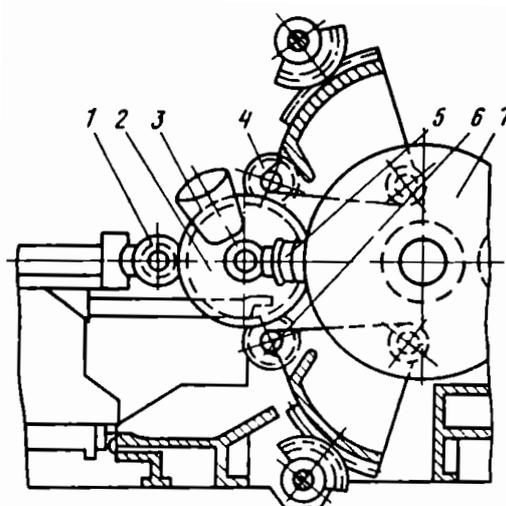


Рисунок 1.5 – Схема прокатки на колесопркатном стане вертикального типа: 1, 4, 6 – направляющие ролики, 2 – заготовка колеса, 3 – боковые валки, 5 – эджерные валки, 7 – нажимной валок [3]

На станах вертикального типа смещение обода относительно ступицы в процессе прокатки по диаметру проявляется в меньшей мере, чем это имеет место в станах горизонтального типа. Также стоит отметить, что положение колеса в вертикальной плоскости обеспечивает устранение дефекта вкатанная окалина, так как вся окалина осыпается вниз во время процесса прокатки, что не происходит на станах горизонтального типа.

Прокатка колес в вертикальном положении позволяет вводить заготовку в стан и одновременно выводить из него прокатанное колесо, что сокращает длительность вспомогательных операций.

Применение колесопркатного стана в технологической схеме производства

колес расширяет технологические возможности производственной линии, однако данному процессу присущи дефекты прокатного производства: эксцентриситет ступицы колеса, закат, плена и т.п. [3, 4, 12].

Окончательной технологической операцией при производстве цельнокатаных колес, является процесс выгибки диска, который обеспечивает выполнение требуемой формы диска колеса. Данная операция, в большинстве случаев, совмещается с прошивкой отверстия в ступице и выполняется на одном гидравлическом прессе.

## **1.2. Обзор технологических схем деформации заготовок на прессопрокатных линиях**

Реализация той или иной технологической схемы деформации заготовок, как было сказано ранее, определяется, прежде всего, составом оборудования конкретной прессопрокатной линии, ее техническими и технологическими возможностями. В зависимости от требуемой производительности, качества исходных заготовок, а также конструкций изготавливаемых колес выделяют различные технологические схемы и режимы их штамповки и прокатки.

Рассмотрим технологические схемы деформации и состав оборудования на прессопрокатных линиях некоторых предприятий [3, 4, 8-11, 37].

В первую очередь, при рассмотрении технологических схем деформации, требуется отметить развитие исследований, разработок и создание полезных моделей использования сферодвижной штамповки при производстве железнодорожных колес (рисунок 1.6) [22- 24].

Основным преимуществом данной технологической схемы является минимальное количество агрегатов в производственной линии – три пресса. На первом прессе усилием 50 МН осуществляются операция по осадке цилиндрической заготовки в кольцо, совмещенная с операцией прошивки центрального отверстия.

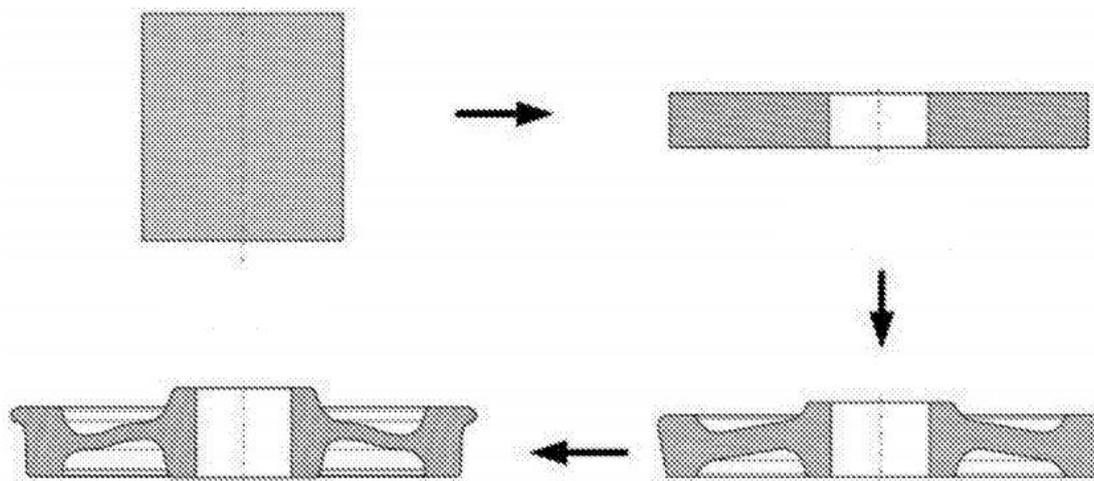


Рисунок 1.6 – Технологическая схема производства железнодорожных колес с использованием сферодвижной штамповки по способу [23]

На втором прессе усилием 80 МН осуществляется первый этап сферодвижной штамповки (рисунок 1.7 а). Заготовка после первой операции укладывается манипулятором на оправку, которая расположена в центре нижнего штампа, благодаря чему обеспечивается центровка заготовки. Верхний штамп совершает колебательное движение за счет того, что ось его отклонена на определенный угол относительно оси нижнего штампа. На первом этапе сферодвижной штамповки происходит раскатка диска, частичное формирование ступицы и обода колеса.

На третьем прессе, также усилием 80 МН, осуществляется второй этап сферодвижной штамповки (рис. 1.7 б). Суть процесса аналогична первому этапу, однако, в данном процессе происходит окончательное оформление и калибровка всех элементов чернового колеса.

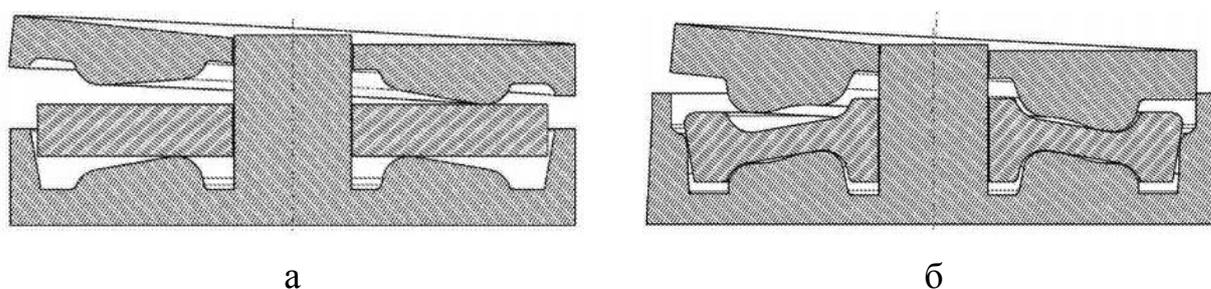


Рисунок 1.7 – Первый (а) и второй (б) этапы реализации процесса сферодвижной штамповки по способу [23]

Помимо вышесказанных преимуществ технологии, стоит отметить повышение точности размеров чернового колеса, а также снижение силовых параметров процесса при использовании сферодвижной штамповки. Однако процесс имеет низкую производительность и повышенные требования к технологической точности при настройке оборудования второго и третьего прессы. Таким образом, выбор технологической схемы с использованием процесса сферодвижной штамповки в первую очередь актуален для предприятий, нацеленных на небольшую производительность технологической линии.

Широко известна технологическая схема производства железнодорожных колес, реализованная на ПАО «Интерпайп НТЗ» (Украина) и АО «ВМЗ» (Россия) [3-4, 6, 31, 33-36], производителем оборудования которых является ОАО «Уралмашзавод». Схема деформации заготовок, используемая на данных прессопрокатных линиях, включает следующие операции (рисунок 1.8): предварительную осадку гладкими плитами с целью удаления окалина с боковой поверхности заготовки на прессе усилием 20 МН; окончательную осадку заготовки в нижнем плавающем технологическом кольце с последующей разгонкой металла заготовки пуансоном, выполняемой за второй ход траверсы на прессе усилием 50 МН; формовку обода, диска и ступицы колесной заготовки в штампах прессы усилием 100 МН; прокатку колесной заготовки с целью формирования обода и прилегающей части диска на колесопрокатном стане горизонтального типа; выгибку диска и калибровку элементов профиля колеса с последующей прошивкой центрального отверстия в ступице на прессе усилием 35 МН.

Выбор подобной технологической схемы, которая была разработана в начале 70-х годов прошлого столетия, с использованием трех прессов перед операцией прокатки на колесопрокатном стане, в первую очередь был обусловлен технологией производства колесной стали, а именно мартеновским способом. При данном способе полученную сталь разливали в изложницы, а разделение слитка на штучные заготовки под прокатку осуществлялось на слитколомателе с образованием шеек на торцах, что не обеспечивало стабильности в массе исходной заготовки [38-39].

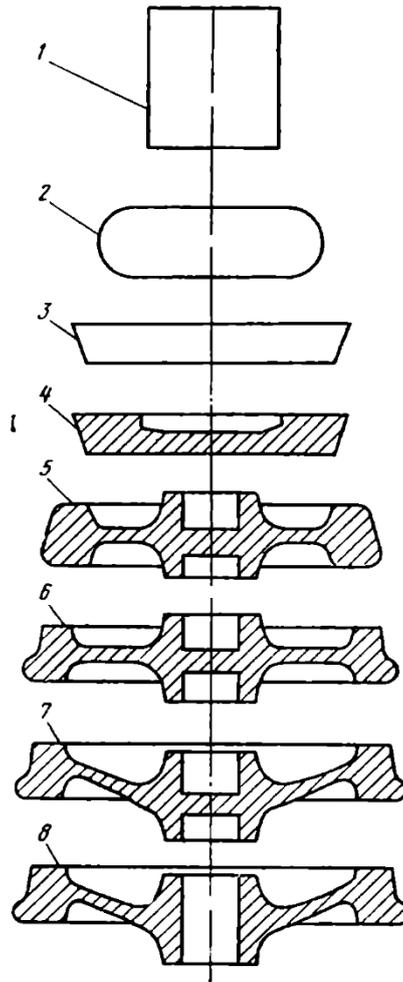


Рисунок 1.8 – Схема формоизменения заготовки при производстве цельнокатаного железнодорожного колеса на прессопрокатных линиях ПАО «Интерпайп НТЗ» и АО «ВМЗ»: 1 – заготовка; 2 – заготовка после свободной осадки; 3 – заготовка после осадки в кольце; 4 – заготовка после разгонки; 5 – заготовка после штамповки; 6 – заготовка после прокатки; 7 – заготовка после выгибки диска и калибровки; 8 – заготовка после прошивки отверстия [3]

Таким образом, использование трех прессов, разделение технологических операций деформации между ними и применение плавающего калибровочного кольца на втором прессе, способствовало получению стабильных геометрических параметров заготовки под прокатку, а также обеспечивало максимальную производительность подобных линий.

Позднее, данная технологическая схема была усовершенствована [14, 39-41], путем совмещения операций окончательной осадки заготовки в нижнем

плавающим технологическом кольце с разгонкой металла на прессе усилием 50 МН, выполняемых за один ход пресса, что дополнительно повысило производительность линии.

Современная технология производства стали транспортного назначения осуществляется, либо с использованием электродуговых печей, либо кислородно-конверторным способом, с последующей разливкой стали на машинах непрерывного литья в заготовки круглого сечения различного диаметра [42]. Последующее разделение непрерывно-литой заготовки на штучные заготовки под прокатку осуществляется на дисковых пилах холодной резки, что в совокупности, со стабильными геометрическими параметрами непрерывно-литой заготовки, обеспечивает максимальную разность по массе исходной заготовки под прокатку не более 10 кг [13, 43-44].

В связи с повышением точности исходной заготовки, выполнение каждой технологической операции на отдельном агрегате перестало быть необходимым, таким образом, у производителей цельнокатаных железнодорожных колес сложилась тенденция к объединению технологических операций, предшествующих прокатке заготовки на стане, тем самым сокращается количество агрегатов в линии [2,6, 7,13, 16, 28-30].

Наиболее широкое распространение в мире получили технологические схемы деформации заготовок, в которых выполняются операции предварительной и окончательной штамповки [2,16,45-46]. Данные операции выполняются, либо на одном гидравлическом прессе усилием порядка 100 МН (Lucchini Sidermeccanica, Masteel, Standart Steel, Kardemir, ТОО «Проммашкомплект»), либо на двух гидравлических прессах с разным усилием – 50 МН (R-5000) и 90 МН (R-9000) соответственно (АО «ЕВРАЗ НТМК»). При выполнении операции на одном прессе, за первый ход траверсы выполняется операция предварительной штамповки на первом подвижном столе, далее при помощи робота-манипулятора, заготовка перемещается на второй стол, где выполняется операция окончательной штамповки за второй ход пресса.

Примером технологической схемы с операциями предварительной и

окончательной штамповки служит схема деформации колесных заготовок, разработанная фирмой «SMS-EUMUCO» [47], которая производила реконструкцию колесобандажного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК» (рисунок 1.9).

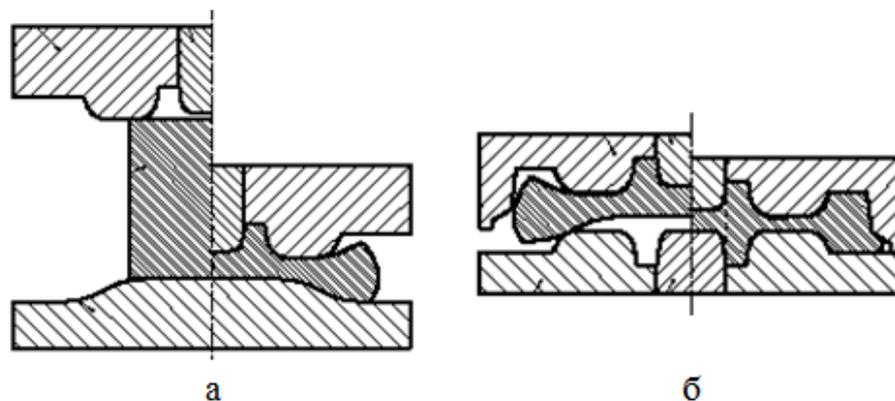


Рисунок 1.9 – Схема предварительной (а) и окончательной (б) штамповки по способу SMS EUMUCO

Особенность технологии заключается в том, что при предварительной штамповке, формируется односторонняя ступица, которая обеспечивает центровку заготовки в штампах второго прессы, при кантовке заготовки на  $180^\circ$ . Для уменьшения силовых параметров, при предварительной штамповке предполагалось свободное течение металла из центральной части в периферийную, без ограничения наружной поверхности обода поковки.

Практическое использование данной технологической схемы показало неудовлетворительные результаты, связанные с высоким количеством брака по черновым колесам.

Основными причинами явились отклонения от идеальных условий параметров исходной штучной заготовки, которые на практике имеют разброс значений по высоте, по массе, а также обладают овальностью и косиной торцевого реза. Перечисленные отклонения приводят к тому, что при предварительной штамповке, поковка получалась овальной, кроме того, отсутствие ограничения наружной поверхности обода поковки способствовало возникновению значительного разброса значений ширины обода по периметру. Таким образом, последующая операция окончательной штамповки заготовки лишь ухудшает

асимметричное распределение металла. Дальнейшее деформирование такой поковки на колесопрокатном стане приводит к образованию различного вида дефектов [13, 47-48].

Для снижения количества брака, сотрудниками комбината была внедрена новая технологическая схема деформации [49], которая заключается в применении на верхнем штампе первого прессы подвижного калибровочного кольца и плоских штампов (рисунок 1.10). Использование данной технологии позволило стабилизировать наружный диаметр заготовки, повысить точность размеров поковки при окончательной штамповке, тем самым повысить качественные показатели [47-48].

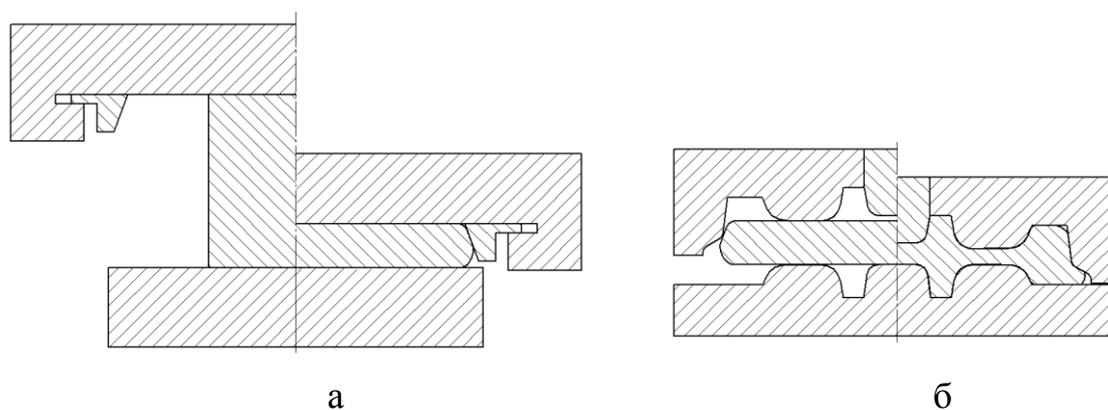


Рисунок 1.10 – Действующая схема предварительной (а) и окончательной (б) штамповки на АО «ЕВРАЗ НТМК»

Однако существенным недостатком данной технологической схемы являются высокие силовые параметры процесса штамповки на обоих прессах, поскольку при предварительной штамповке не обеспечена разгонка металла из центральной части заготовки в периферийную. Также отсутствует возможность самоцентрирования заготовки в штампах второго прессы, позиционирование заготовки в настоящее время зависит от точности работы робота-манипулятора и центрователей.

Выполнение операции разгонки на этапе предварительной штамповки крайне необходимо для распределения металла между центральной и периферийной частями штампованной поковки. Если предварительная штамповка производится

без выполнения операции разгонки, то при последующей окончательной штамповке имеет место односторонняя схема течения металла, из зоны диска в зону обода, что способствует повышению силы штамповки. Причиной является наличие в центральной части заготовки избыточного объема металла, который в первую очередь заполняет штампы в зоне ступицы при окончательной штамповке.

В ряде патентов [50-59, 61] и научных работах [16, 62-70] представлены различные способы реализации предварительной штамповки, с учетом обеспечения разгонки металла, которые возможно реализовать на современных прессопрокатных линиях.

Таким образом, актуальна разработка способов штамповки колесных заготовок, которые бы позволяли выполнять на прессе R5000 регламентированное распределение металла между центральной и периферийной частями заготовки, обеспечивая их самоцентрировку на формовочном прессе R9000 и получение стабильных размеров колесных заготовок.

### **1.3. Современные методы моделирования процессов деформации**

При разработке, исследовании и внедрении новых технологических схем производства продукции используют различные методы моделирования. Это обусловлено сокращением издержек на разработку и внедрение новых технологических процессов.

-В настоящее время при разработке технологий обработки металлов давлением, наиболее эффективными являются физическое и математическое моделирование.

Физическое моделирование процессов – это воспроизведение в лабораторных условиях на небольших образцах процессов, которым подвергается металл при промышленном производстве. Важной задачей является приведение лабораторных режимов деформации к состоянию максимально близкому к промышленным условиям.

Физическое моделирование обеспечивает высокую сходимость результатов с реальным процессом при соблюдении критерия геометрического подобия модели

и натурального объекта, помимо этого достоверность результатов обеспечивает подобие физических, механических свойств и температурных условий модели и натурального объекта.

В качестве модельного материала, помимо металлов и сплавов, используемых в реальном производстве, применяют также пластилин или различные марки пластопарафина, эффективность которых подтверждена в ряде публикаций [71-72].

С целью исследования течения металла при штамповке колесной заготовки, в работе [73] проведено физическое моделирование, в котором в качестве деформируемого материала использовался пластопарафин(рисунок 1.11).

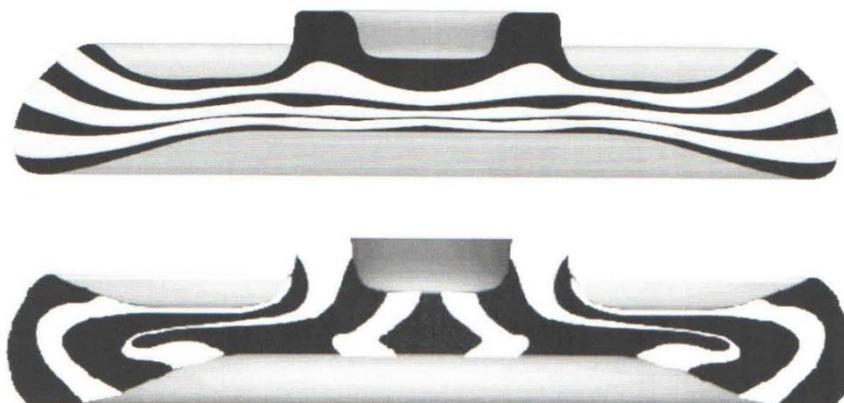


Рисунок 1.11 – Схема течения горизонтальных и вертикальных слоев пластопарафина при моделировании операции предварительной штамповки

Особенность данного моделирования заключалось в создании слоистой исходной модели, причем каждый слой пластопарафина был различного цвета, что способствовало наглядному отражению картины течения металла при деформации заготовки в операциях предварительной и окончательной штамповки.

Помимо физического моделирования, проводимого в лабораторных условиях, в производственных условиях для исследования течения металла в процессе деформации и изучения характеристик деформированного состояния,

применяют метод физического моделирования с использованием штыревой модели (рисунок 1.12).

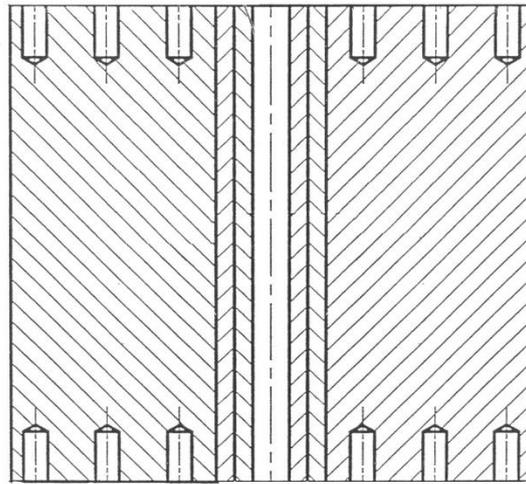


Рисунок 1.12 - Заготовки для штыревой модели

Моделирование осуществляется на производственной линии с использованием заготовки, имеющей заранее подготовленные отверстия, в которые вставляются штыри (стержни) из другой марки стали, для последующего наблюдения за изменением формы и взаимным расположением штырей в штыревой модели (рисунок 1.13) [4].

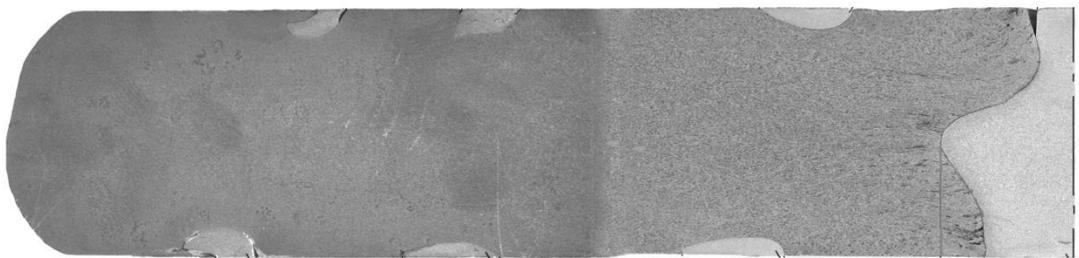


Рисунок 1.13 – Темплет штыревой модели после деформации заготовки на прессе R5000

Преимуществом данного способа физического моделирования является получение наиболее достоверных данных о течении металла, неравномерности деформации и влиянии трения.

Трудоемкость методов лабораторного и промышленного физического моделирования исследуемых и проектируемых процессов в сфере обработки металлов давлением, привела к созданию качественно новой технологии проведения исследований, использующей инструмент имитирования - воссоздание на компьютере специально созданными программами математических моделей, воспроизводящих технологические процессы.

Имитационное моделирование на цифровых вычислительных машинах является одним из наиболее мощных средств исследования. Как и любое компьютерное моделирование, оно дает возможность проводить вычислительные эксперименты с еще только проектируемыми системами и изучать системы, натурные эксперименты с которыми из-за соображений безопасности или высокой стоимости нецелесообразны. В то же время, этот метод исследования доступен более широкому кругу пользователей.

Значительную долю программных продуктов составляют расчетные программы, разработанные на основе численных методов. Эти программы в последние годы широко применяются и играют главенствующую роль на предприятиях, где используются операции обработки металлов давлением. Для разработки и оптимизации технологии и инструмента с начала 1990-х годов начали применяться расчетные программы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Первые варианты программ позволяли моделировать плоскую и осесимметричную деформацию, а с середины 1990-х годов появилась возможность расчета трехмерной деформации [74-78].

Основополагающими идеями метода являются: дискретизация очага деформации на конечные, но достаточно малые по размерам элементы; способ аппроксимации искомым функций (компоненты вектора скорости  $v_i$ , среднее нормальное напряжение  $\sigma$  и температура  $\theta$ ) в пределах конечного элемента в локальных координатах, обеспечивающий непрерывность искомым функций на границе с окружающими конечными элементами и удовлетворение граничных условий на поверхности деформируемого тела; определение искомым функций в узлах конечных элементов (варьируемых параметров вариационной задачи) из

условия минимума функционала [79, 122]. Практическая значимость метода конечных элементов заключается в создании пакетов программ для решения задач обработки металлов давлением.

Создание адекватных компьютерных моделей технологических процессов ОМД осуществлялось до недавнего времени каждым исследователем самостоятельно, поэтому выбирался свой вариант постановки задачи, а на создание алгоритма, разработку, отладку и тестирование программного обеспечения зачастую уходили годы труда целого коллектива. С развитием средств вычислительной техники и снижением стоимости сертифицированного программного обеспечения для компьютерного моделирования все чаще стали применяться специальные программные комплексы (ПК) такие, как ANSYS, Abaqus, Mars, Deform, Q-Form, Forge [80-92] и др., позволяющие выбрать не только материал из стандартной библиотеки комплекса, но и вариант постановки краевой задачи.

Данные программные продукты позволяют моделировать полный цикл производства изделия, включая выполнение комплекта рабочей документации, проектирование технологических процессов и прогнозирование его показателей, а также осуществлять имитационное моделирование действующих при эксплуатации детали нагрузок, определять опасные зоны, допустимые нагрузки и вид разрушения. При этом анализ виртуального производства дает возможность выявить ошибки и возможные дефекты в изделиях еще на стадии проектирования, что приводит к повышению качества продукции и эффективности производства.

Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением позволяет, при помощи современных компьютерных программ, значительно сократить время на разработку новой технологии производства продукции и анализ существующих технологий, с целью их оптимизации.

Основными задачами компьютерного моделирования являются: исследование формоизменения металла; изучение влияния схемы и режима деформации на геометрические параметры изделия; расчет степени и скорости деформации, напряжений и температуры в объеме и на поверхности заготовки на

различных этапах технологического процесса; расчет энергосиловых параметров исследуемого процесса деформации.

Процесс расчёта напряжённо-деформированного состояния является трудной вычислительной задачей, поэтому для ее решения применяют математическое моделирование, выполняемое в специализированных программных продуктах основанных на методе конечных элементов, который зарекомендовал себя, как инструмент для анализа и оптимизации процессов обработки металлов давлением. Достоинством компьютерного моделирования является высокая информативность, наглядность представления результатов и их обработки.

Одним из наиболее популярных программных пакетов для выполнения моделирования, основанных на МКЭ, является CAD/CAE-система Deform, разработанная американской компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC).

Программа позволяет автоматически, с учетом геометрии исходной заготовки и инструмента деформации, генерировать сетку конечных элементов, которая также автоматически пересматривается на каждом следующем шаге деформирования. Постпроцессор результатов моделирования позволяет анализировать формоизменение металла на протяжении всего процесса деформирования, в том числе на каждом заданном отдельном шаге, отображая векторное поле течения металла, поля напряжений, температуры, скорости и степени деформации, распределение контактных давлений на поверхности инструмента, графики энергосиловых параметров технологического процесса.

Программный комплекс Deform предназначен для моделирования практически всех технологических процессов ОМД (ковки, штамповки, прокатки, прессования, вытяжки, высадки и др.), а также операций термической обработки (закалки, старения, отпуска и др.) и механообработки (фрезерования, сверления и др.). Deform позволяет выполнить анализ двухмерного (2D) [93-96] и трехмерного (3D) [97-100] поведения материала при различных процессах ОМД, дает важную информацию о течении материала и распределении температур во время

моделирования.

Программный комплекс обладает целым рядом преимуществ: универсальность - программа Deform позволяет моделировать широкий круг технологических процессов, применяемых на производстве; совместимость с большинством программных пакетов; большая база данных по характеристикам материалов и кузнечнопрессового оборудования, а также широкие возможности по их редактированию и добавлению; возможность моделирования различных условий трения между заготовкой и инструментом; простой и удобный интерфейс.

Применение программного комплекса Deform для моделирования технологических процессов предварительной и окончательной штамповки, прокатки, представлено в ряде работ отечественных и зарубежных исследователей [38, 48, 63-67, 69, 70, 81-85, 92, 95-97, 100-116].

В работе [14, 39] при помощи программного комплекса Deform, предложена усовершенствованная технология штамповки колесных заготовок, для существующей технологической схемы производства, используемой на ОАО «ВМЗ» и ПАО «Интерпайп НТЗ».

Компьютерное моделирование процесса предварительной штамповки колесной заготовки [13, 67, 101] с использованием программы Deform способствовало разработке нового способа предварительной штамповки с использованием «плавающего» калибровочного кольца.

Математическое моделирование в программном комплексе Deform показало возможность получения железнодорожных колес из полых заготовок, полученных способом винтовой прокатки, без изменения существующей технологической схемы производства черновых колес [102, 104, 107].

В работе [108] проведен анализ влияния режима предварительной штамповки на формоизменение и энергосиловые параметры чистовой штамповки цельнокатаных колес, а также даны рекомендации по совершенствованию калибровки для обеспечения осевой симметрии чернового колеса.

На основе результатов конечно-элементного моделирования, выполненного в Deform [109-110, 114], произведен анализ влияния схем штамповки колесных

заготовок на силовые режимы работы формовочного прессы и износ инструмента деформации, применительно к современным прессопрокатным линиям.

В работе [116] проведено математическое моделирование производства заготовок железнодорожных колес на основе программного продукта Deform 3D. Получены результаты определения геометрического положения в исходной заготовке объемов, из которых в процессе штамповки формируются элементы колеса (обод, диск и ступица); также произведена оценка деформированного состояния в характерных зонах колесной заготовки.

В работах [69-70, 117-121], на основе компьютерного моделирования в программном комплексе Deform, осуществлен анализ технологических схем производства железнодорожных колес, произведено исследование формоизменения металла при использовании существующих калибровок. На основе моделирования исследовано влияние технологических параметров на точность черновых колес, осуществлен выбор рациональной технологической схемы предварительной штамповки, подготовлены рекомендации по выбору оптимального соотношения геометрических параметров заготовки, которые создают условия равномерного радиального течения металла по периметру заготовки, с целью уменьшения припусков на механическую обработку.

#### **1.4 Выводы по разделу и постановка задач исследования**

На основании проведенного литературного обзора можно сделать следующие выводы.

1. Основным способом изготовления железнодорожных колес, является технология, совмещающая в себе несколько чередующихся операций штамповки колесной заготовки, с последующей прокаткой на колесопрокатном стане. Основная тенденция развития современных производственных линий по выпуску железнодорожных колес, основывается на совмещении операции штамповки, предшествующих операции прокатки на колесопрокатном стане, на одном-двух гидравлических прессах, что позволяет сократить затраты на покупку и обслуживание дорогостоящего оборудования. Актуально установить влияние

различных схем предварительной и окончательной штамповки на формоизменение колесной заготовки. В частности, для технологической схемы АО «ЕВРАЗ НТМК», целесообразно разработать альтернативный способ предварительной штамповки колесной заготовки, обеспечивающий высокую точность и стабильность геометрических параметров чернового колеса, и равномерную загрузку технологического оборудования.

2. Технология предварительной штамповки должна обеспечивать регламентированное распределение металла между центральной и периферийной частями штампованной поковки. Требуется выполнить развитие представлений, определяющих положение нейтрального сечения в зоне диска колесной поковки, относительно которой в последний момент операции окончательной штамповки колесной заготовки, металл течет в зоны обода и ступицы. Актуально разработать рекомендации по выбору оптимальных соотношения геометрических параметров поковки, обеспечивающие рациональные потоки металла при предварительной и окончательной штамповке.

3. Применение компьютерных программ моделирования, основанных на методе конечных элементов, является передовым при разработке, исследовании и внедрении новых технологических схем производства продукции. Недостаточно освещен вопрос выбора начальных и граничных условий для выполнения компьютерного моделирования, обеспечивающего высокую точность расчетов формоизменения металла и силовых параметров процессов штамповки при производстве черновых колес. В частности, для технологического процесса, реализованного на АО «ЕВРАЗ НТМК», актуально выполнить адаптацию методики компьютерного конечно-элементного моделирования, обеспечивающую высокую сходимость результатов моделирования с промышленными данными.

В связи с вышеизложенным, сформулирована цель работы – осуществление совершенствования технологии производства цельнокатаных железнодорожных колес на основе компьютерного моделирования.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи:

1. Определить начальные и граничные условия и создать компьютерную модель процессов деформации, адаптированную для условий промышленного производства железнодорожных колес.
2. Оценить влияние технологических факторов на точность изготовления колес в зависимости от калибровки инструмента и режимов деформации.
3. Определить оптимальные соотношения геометрических параметров поковки, обеспечивающие рациональные потоки металла при штамповке.
4. Разработать, исследовать и провести промышленное опробование способа предварительной штамповки, совмещающего процессы осадки и разгонки.
5. Выполнить анализ уровня бракованной продукции по видам дефектов, разработать и внедрить систему статистического контроля процесса производства.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВКИ

### 2.1. Постановка краевой задачи

В настоящей работе для исследования процессов предварительной и окончательной штамповки заготовки при производстве цельнокатаных железнодорожных колес был использован программный комплекс Deform V6.1 (лицензия АО «ЕВРАЗ НТМК»).

Постановку задачи в программном пакете Deform выполняли в соответствии с указаниями работы [123]. Построение геометрии исходной заготовки и инструмента деформации выполнено в CAD-системе SolidWorks, с последующей передачей в пакет Deform в формате «.stl». Основной задачей при постановке компьютерного моделирования, было максимально точное воссоздание производственных условий в операциях предварительной и окончательной штамповки.

В качестве материала для исходной заготовки использовали марку стали 2 по ГОСТ 10791-2011 [124]. Используемые для компьютерного моделирования теплофизические свойства данной марки стали взяты из базы данных Deform для высокоуглеродистой стали. Для исходной заготовки использовалась пластическая модель материала.

Очень важную роль в достижении высокой точности решения задачи моделирования играет задание приближенных к реальным условиям данных о свойствах материала.

Для уточнения пластических свойств марки стали 2 был проведен статистический анализ по химическому составу данной марки за период пяти лет (2015 -2020 г.), приведенный в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав марки стали 2

Параметр	Содержание химических элементов, %												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Ti	Nb	Mo	Al
ГОСТ 10791	0,55-0,63	0,50-0,90	0,22-0,45	не более									-
				0,030	0,025	0,30	0,30	0,30	0,10	0,03	0,05	0,08	
Min	0,590	0,800	0,350	0,0079	0,0020	0,017	0,037	0,005	0,021	0,0020	<0,005	<0,005	0,0023
Max	0,630	0,890	0,440	0,0260	0,0200	0,162	0,126	0,017	0,057	0,0060	<0,005	<0,005	0,0080
Среднее	0,605	0,832	0,384	0,0159	0,0073	0,040	0,046	0,008	0,026	0,0025	<0,0050	<0,005	0,0043

На основе данных по среднему содержанию химических элементов, при помощи программного пакета JMatPro, были построены зависимости (рисунок 2.1 а, б), сопротивления деформации от степени, скорости и температуры деформации для исследуемого диапазона температур (1000 – 1300 °С) в формате табличных данных (2.1), которые были размещены в базе данных материалов программного пакета Deform

$$\sigma = \sigma (\varepsilon, \zeta, T), \quad (2.1)$$

где  $\sigma$  – сопротивление металла деформации,

$\varepsilon$  – степень деформации материала,

$\zeta$  – скорость деформации материала,

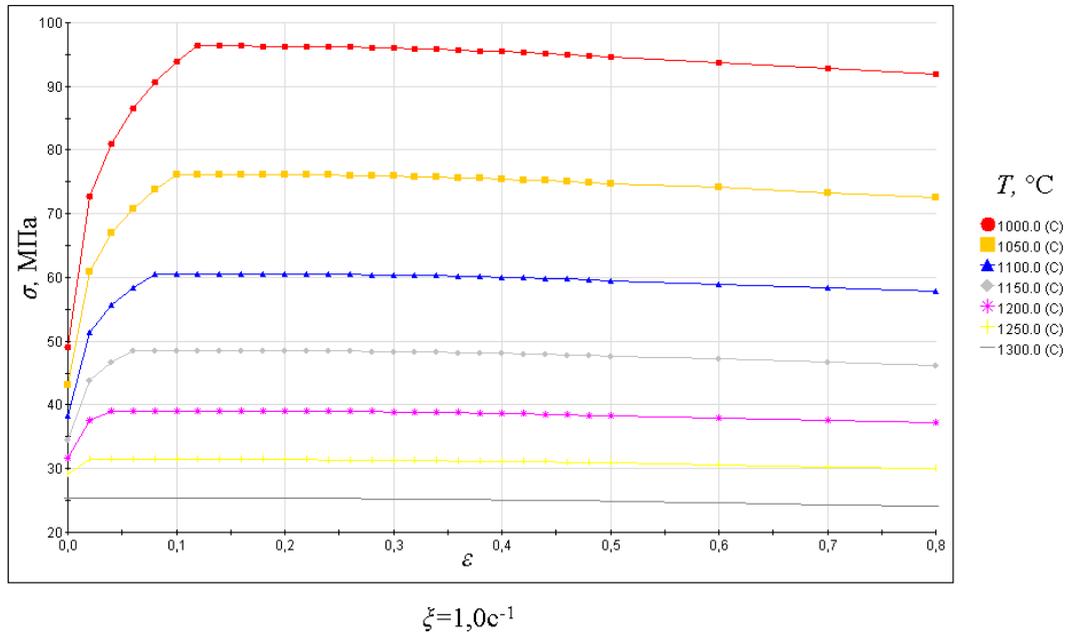
$T$  – температура.

Для генерации конечно-элементной сетки использовался автоматический режим с разбиением исходной заготовки на тетрагональные элементы, имеющие размеры каждой грани в диапазоне 2,0 – 8,0 мм, что позволяет описать сложную геометрию колесной заготовки достаточно точно на стадиях предварительной и окончательной штамповки.

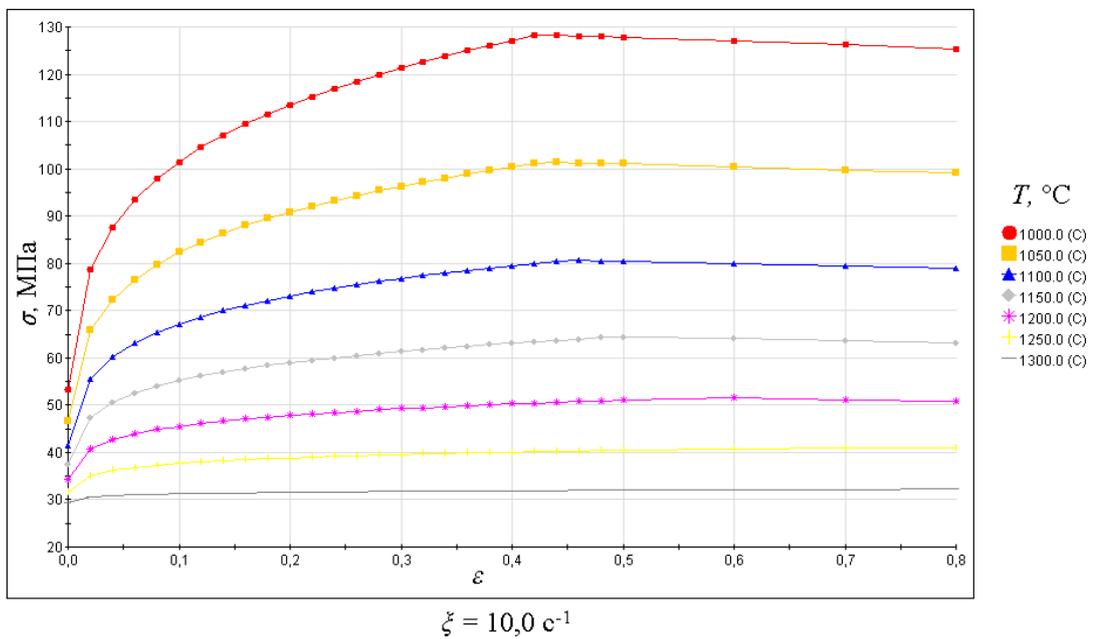
Также при решении было выполнено условие сохранения исходного объема заготовки, что является крайне важным при решении многоэтапных задач [105, 113]. В качестве исходного объема, был выбран объем исходной заготовки, импортируемый в программу Deform из CAD-системы SolidWorks. В процессе моделирования также учитывался параметр непроницаемости заготовки на границе контакта металла с инструментом деформации.

Моделирование всех технологических процессов выполнено для нестационарного теплового режима исходной заготовки, с учетом процессов

теплообмена деформируемого металла с окружающей средой, как при деформации, так и во время транспортировки заготовки между операциями, а также с учетом теплового эффекта при пластической деформации металла.



а



б

Рисунок 2.1 – Кривые упрочнения марки стали 2 при различных скоростях деформации  $\dot{\zeta}$  (а –  $1,0 \text{ c}^{-1}$ , б –  $10,0 \text{ c}^{-1}$ ).

С целью уточнения исходных данных для моделирования температурных полей на поверхности заготовки, осуществлено измерение температуры тридцати заготовок тепловизором THERMO TRACE. Измерения температуры заготовки проводились после установки гидросбива окалины, перед операцией предварительной штамповки на прессе R-5000, а также перед и после операции окончательной штамповки на прессе R-9000. Результаты измерений представлены в таблице 2.2. Измерение температуры заготовки после нагревательной печи не проводилось, поскольку поверхностный слой образовавшейся окалины занижает результат, исходная температура заготовки для моделирования была принята равной 1300°C, которая обусловлена технологией нагрева.

Таблица 2.2 – Результаты замера температуры заготовки

Статистические параметры	После гидросбива, °С	Перед прессом R 9000, °С	После прессы R 9000, °С
Среднее	1125,34	1064,43	985,45
Минимум	1088	1021	944
Максимум	1153	1088	1003

Полученные данные по изменению температуры заготовки на различных технологических этапах производства будут использованы для оценки точности компьютерного моделирования.

Для определения начальной температуры инструмента деформации в операциях предварительной и окончательной штамповки, требуемой для моделирования, было проведено измерение температуры поверхности штампов в паузе между операциями штамповки при установившемся темпе работы прессопрокатной линии (рисунок 2.2, 2.3).

На основе проведенных измерений, начальная температура инструмента деформации для операций предварительной и окончательной штамповки была принята равной 300 °С.

Температура окружающей среды и коэффициент теплообмена были приняты постоянными, за исключением операции гидросбива окалины, где коэффициент теплообмена был выбран из условия взаимодействия заготовки с напором воды.

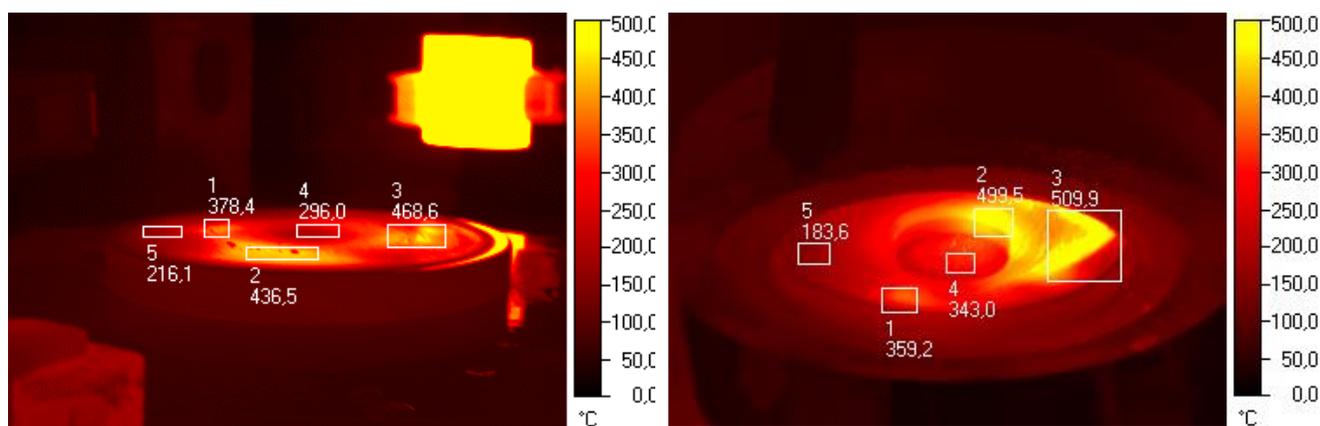


Рисунок 2.2. – Распределение температуры на поверхности инструмента деформации прессы R-5000

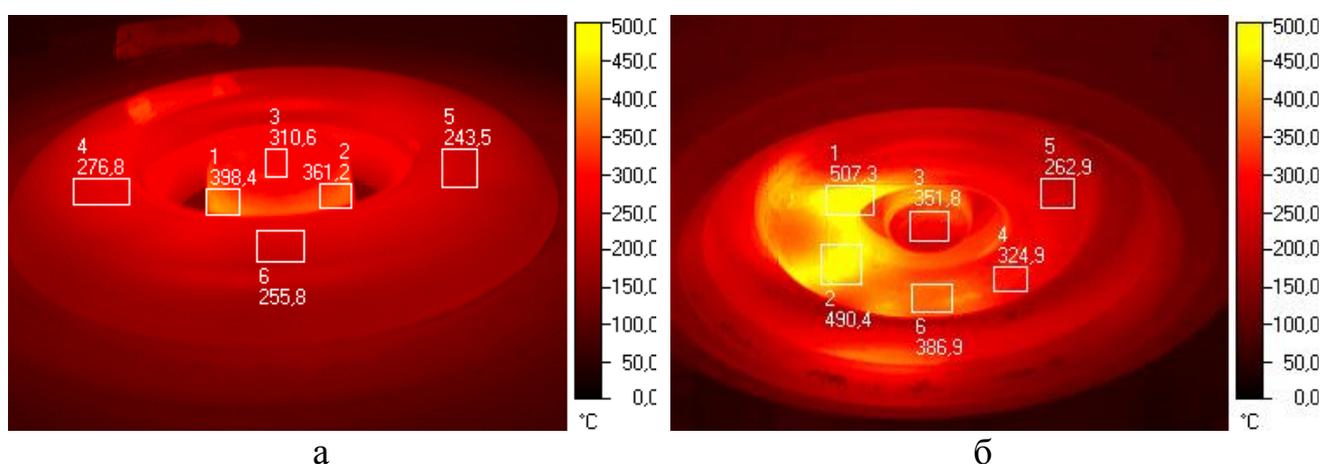


Рисунок 2.3 – Распределение температуры на поверхности инструмента деформации прессы R-9000

Граничные условия на поверхности контакта исследуемой заготовки и инструмента деформации заданы условием трения по Зибелю

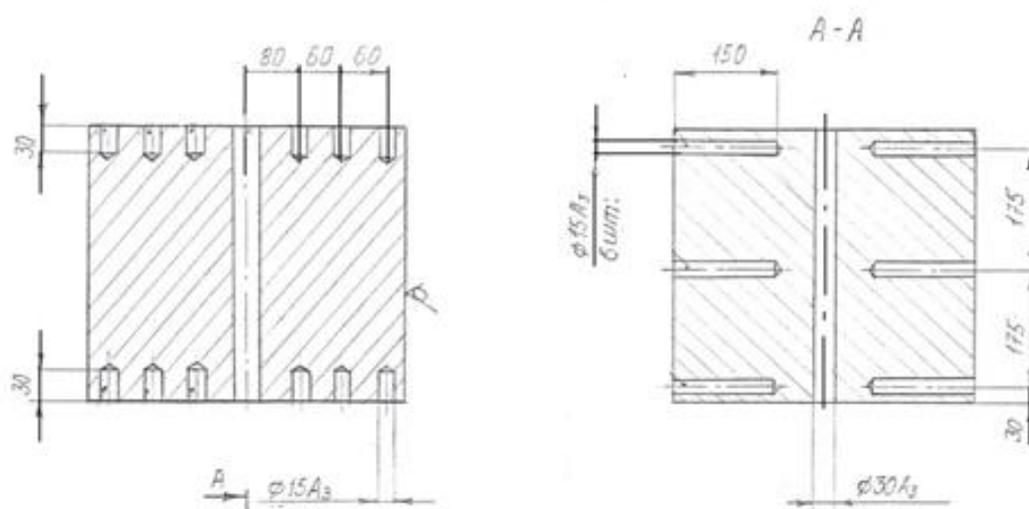
$$\tau = \psi \cdot \tau_s, \quad (2.2)$$

где  $\tau$  – напряжение трения;

$\psi$  – показатель сил трения;

$\tau_s$  – сопротивление металла сдвиговой деформации.

Для обеспечения сходимости результатов компьютерного моделирования с промышленными данными проведено опытное производство заготовок со штыревой моделью (рисунок 2.4) с целью дальнейшего определения показателя силы трения.



а

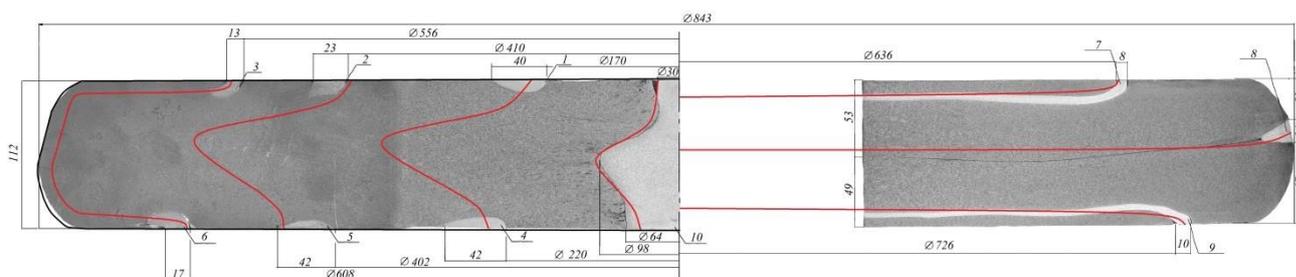


б

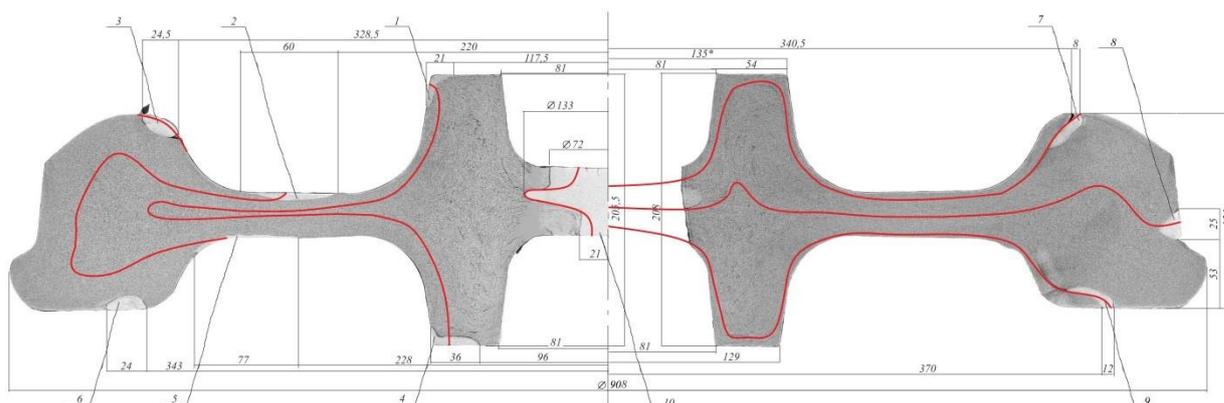
Рисунок 2.4 – Штыревая модель (а – схема расположения отверстий в заготовках под монтаж штырей в вертикальном положении на виде слева и в горизонтальном положении на виде справа, б – фото заготовки для проведения опыта)

В ходе проведения опыта было подготовлено и прокатано четыре штыревые модели. Все штыри изготавливали из углеродистой марки стали Ст.3, имеющей различную степень растворимости в соляной кислоте с маркой стали колесной заготовки. Недокаты от штыревых моделей были сняты с технологической линии после прессы R-5000 и R-9000.

Для определения показателя трения проведено несколько вариаций компьютерного моделирования операций предварительной и окончательной штамповки с различными показателями трения с последующим наложением сетки Лагранжа, для сравнения в графическом пакете результатов промышленного эксперимента штыревой модели с результатом компьютерного моделирования (рисунок 2.5).



а



б

Рисунок 2.5 – Сравнение результатов промышленного эксперимента на основе штыревой модели (вертикальное расположение штырей на виде слева и горизонтальное расположением штырей на виде справа) с компьютерным моделированием и наложением сетки Лагранжа (а – заготовка после операции предварительной штамповки, б – заготовка после операции окончательной штамповки)

При сравнении результатов математического моделирования и промышленного эксперимента требовалось, чтобы при наложении сетки Лагранжа максимально точно описывалось положение штырей в опытной заготовке.

На основе выполненной работы определены значения показателя трения для условий контактного взаимодействия заготовки с инструментом деформации в операциях предварительной и окончательной штамповки при наличии графитовой технологической смазки, которые составили  $\psi = 0,4$  – для верхнего инструмента и  $\psi = 0,3$  – для нижнего инструмента.

Для инструмента деформации была выбрана модель абсолютно жесткого (недеформируемого) материала. Выбор именно этого типа материала для инструмента деформации объясняется тем, что время расчета при моделировании значительно сокращается, нежели при использовании упруго-пластической модели для инструмента. В качестве материала использовали имеющуюся в библиотеке Deform штамповую сталь AISI-H-13, что близка по характеристикам к стали 5ХНМ, которая используется для производства инструмента деформации, с соответствующими механическими и теплофизическими характеристиками, зависящими от температуры.

Для компьютерного моделирования, в качестве оборудования выбран гидравлический пресс, с заданием скорости рабочего хода инструмента, максимальным развиваемым усилием и временной выдержкой, при достижении заданной величины перемещения инструмента. Скорость перемещения траверса на прессах при операциях предварительной и окончательной штамповки была выбрана на основе технологических данных, и составила 30 мм/с для прессы R-5000 и 10 мм/с для прессы R-9000.

Для решения использовали метод Ньютона – Рафсона. Моделирование выполнено путем решения объемной задачи для сектора заготовки, имеющего угол  $180^\circ$  и с геометрическими размерами, которые соответствуют натуральным.

## **2.2. Анализ действующей технологической схемы предварительной и окончательной штамповки**

С использованием программного пакета Deform осуществлено моделирование операций предварительной и окончательной штамповки для действующей технологической схемы производства железнодорожных колес в условиях прессопрокатной линии АО «ЕВРАЗ НТМК», установлены характерные особенности течения металла для данной технологии.

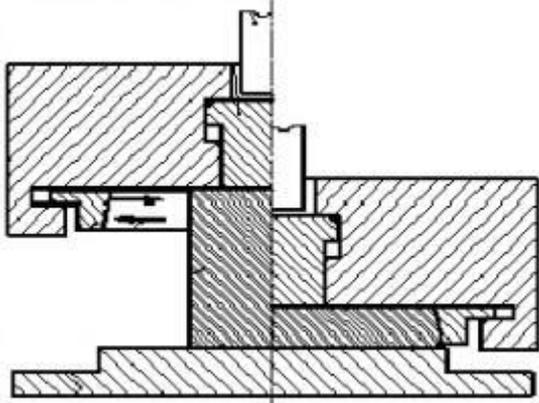
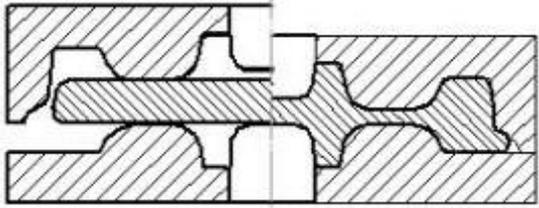
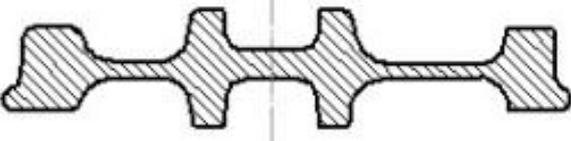
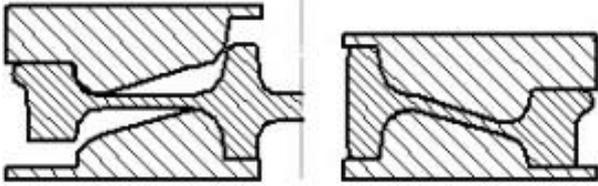
Производство железнодорожных колес на АО «ЕВРАЗ НТМК» осуществляется по современной технологической схеме: высококачественная непрерывнолитая заготовка подвергается раскрою на пилах холодной резки, нагрев осуществляется с минимальным окалинообразованием с последующим удалением окалины при помощи установки гидросбива.

Формоизменение нагретой заготовки осуществляется на гидравлических прессах в операциях предварительной и окончательной штамповки с последующей прокаткой штампованной поковки на колесопрокатном стане вертикального типа и завершающей операцией – прессовой калибровки колеса с выгибкой диска и прошивкой отверстия в ступице [47, 101].

При освоении новой прессопрокатной линии на АО «ЕВРАЗ НТМК» было установлено, что технологическая схема производства черновых колес, разработанная фирмой поставщиком оборудования «SMS EUMUCO», не позволяет получить стабильные размеры черновых колес: минимальное значение суммарного брака по черновым колесам составляло 20,4% [67].

Удалось решить проблему повышения качества колес, применив новый способ предварительной штамповки [49], используя на верхнем штампе пресса R 5000 подвижное калибровочное кольцо и плоские штампы. Освоение нового способа предварительной штамповки способствовало повышению точности черновых колес и уменьшению брака до 1,5 % [120, 121]. Действующая технология производства колес на АО «ЕВРАЗ-НТМК» представлена в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Технологическая схема производства колес на АО «ЕВРАЗ-НТМК»

Схема деформации	Оборудование и название операции
	<p align="center"><b>Пресс R-5000</b></p> <p align="center">Предварительная штамповка на плоских плитах с плавающим калибровочным кольцом</p>
	<p align="center"><b>Пресс R-9000</b></p> <p align="center">Окончательная штамповка с формированием ступицы и обода</p>
	<p align="center"><b>Колесопрокатный стан DRAW 1400</b></p> <p align="center">Прокатка на девятивалковом стане</p>
	<p align="center"><b>Пресс K-5000</b></p> <p align="center">Прессовая калибровка колеса, выгибка диска и прошивка ступицы</p>

Для обеспечения сходимости результатов компьютерного моделирования и опытных данных, начальные и граничные условия задавались максимально приближенными к реальным условиям производства, о которых было более подробно описано в разделе 2.1. Помимо операций деформации, произведено моделирование: транспортировки заготовки от нагревательной печи до установки гидросбива, процесс удаления окалины в установке гидросбива, а также транспортировка заготовки до пресса R-5000 и R-9000. По результатам моделирования установлены основные стадии формоизменения колесной заготовки в операциях предварительной и окончательной штамповки.

Начальная стадия осадки заготовки при выполнении операции предварительной штамповки характеризуется осесимметричной деформацией. Вторая стадия начинается с момента соприкосновения заготовки с калибровочным кольцом и до установления равномерного по периметру контакта с заготовкой, в результате которого кольцо смещается до соосного положения с заготовкой. На последующей стадии происходит формирование боковой поверхности заготовки с односторонним течением металла, во время которой увеличивается ширина контактной поверхности заготовки с калибровочным кольцом. На завершающей стадии деформации происходит уменьшение зазора между верхним и нижним инструментом деформации (далее - величина недоштамповки) до минимума, а деформация является осесимметричной (рисунок 2.6 а).

Первая стадия операции окончательной штамповки характеризуется двухсторонним течением металла из области диска колесной заготовки в области ступицы и обода, что обусловлено наличием нейтрального сечения. Стоит отметить, что область ступиц при этом формируется так же и за счет уменьшения высоты перемычки. Окончание первой стадии деформации происходит в момент завершения формирования ступицы колеса, при этом величина недоштамповки составляет 7,6 мм.

Вторая стадия операции окончательной штамповки характеризуется отсутствием нейтрального сечения, наблюдается одностороннее течение металла в радиальном направлении, поскольку металл во всех зонах заготовки течет в область обода колеса. Для второй стадии характерно резкое повышение силы штамповки, которая достигает значения 80,2 МН в момент окончания процесса, что также связано и с увеличенной площадью поверхности контакта заготовки с инструментом деформации (рисунок 2.6 б).

Помимо проведения компьютерного моделирования, проведен анализ течения металла для действующей технологии на основе результатов проведенного опыта со штыревой моделью.

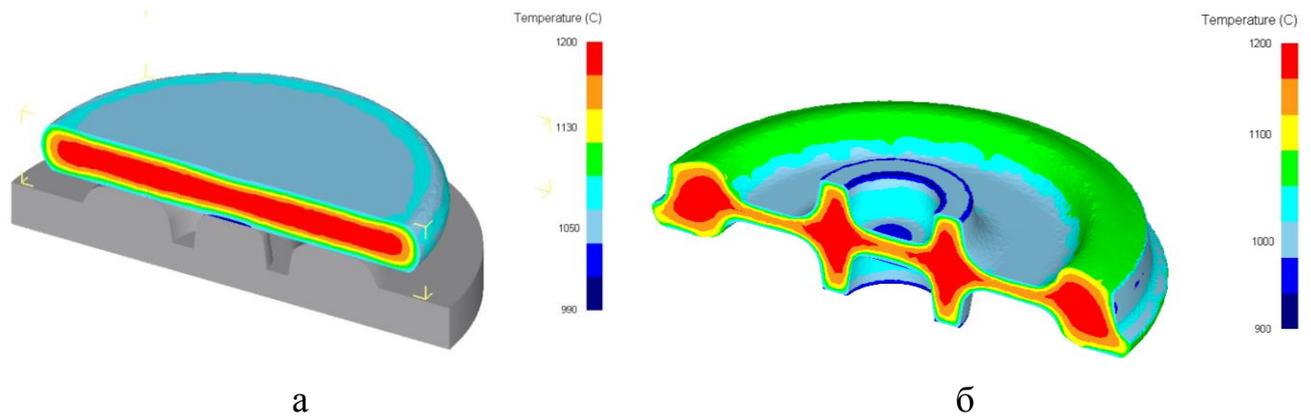


Рисунок 2.6 – Результаты моделирования операций: а – предварительной и б – окончательной штамповки.

Для операции предварительной штамповки положение вертикальных штырей (№ 1-6) на торцевой поверхности заготовки, после деформации на первом прессе R-5000 (рисунок 2.7), свидетельствует о том, что в радиальном направлении металл испытывает стесняющее действие плавающего кольца.

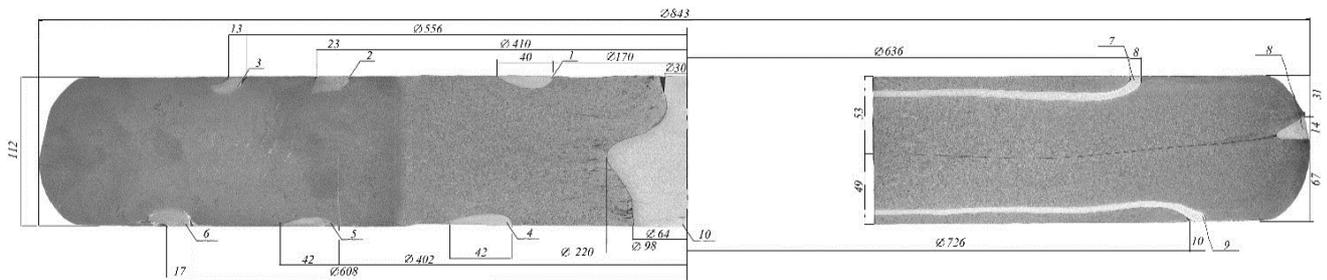


Рисунок 2.7 – Темплеты штыревой модели после деформации на прессе R-5000 (слева – вертикальное расположение штырей, справа – горизонтальное расположение штырей)

Положение верхней кромки заготовки на верхней торцевой поверхности соответствует  $\varnothing 610$  мм. Положение нижней кромки заготовки на нижней торцевой поверхности соответствует  $\varnothing 700$  мм. В данных зонах металл имеет пониженную температуру после осадки на прессе R-5000.

Центральный радиальный штырь №8 (рисунок 2.7) по боковой поверхности находится не по центру и смещен в сторону верхней торцевой поверхности вследствие стесняющего действия калибровочного кольца. Верхний радиальный штырь № 7 на заготовке переходит на торцевую поверхность значительно ближе к

центру заготовки, чем нижний штырь № 9 по причине разной величины контактного трения на верхнем и нижнем инструменте деформации и от подпирающего действия калибровочного кольца.

Анализируя результаты штыревой модели, после операции окончательной штамповки, были выявлены следующие особенности течения металла в центральной зоне. Со стороны нижнего штампа в области перемычки в ступице центральный вертикальный штырь №10 уменьшается в диаметре (рисунок 2.8), а со стороны верхнего штампа, напротив, идет увеличение диаметра. Таким образом, можно сделать вывод, что металл из нижней части заготовки перемещается в верхнюю, вследствие того, что металл сначала заполняет нижнюю область ступицы, а после, избыток металла заполняет верхнюю область ступицы. Аналогично объясняется смещение штыря №1 относительно штыря №4 ближе к области яблока ступицы, которое происходит вследствие перетекания металла из одной зоны в другую.

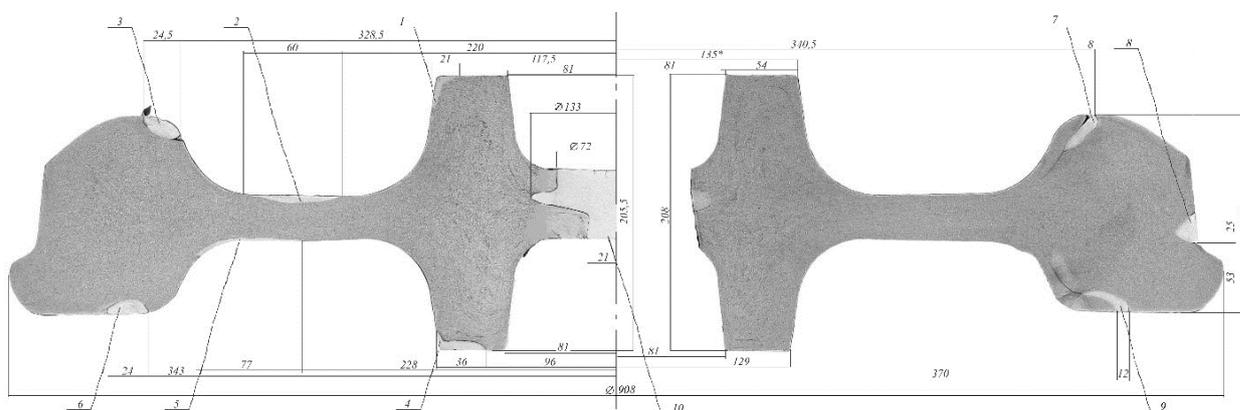


Рисунок 2.8 – Темплеты штыревой модели после деформации на прессе R-9000 (слева – вертикальное расположение штырей, справа – горизонтальное расположение штырей)

Диаметр и положение центрального вертикального штыря после прессы R-9000 позволяют сделать вывод, что осевая ликвация, размер которой составляет 60 мм, гарантированно удаляется при прошивке отверстия ступицы на прессе R-5000.

Для области обода и диска заготовки, после операции окончательной штамповки, были выявлены следующие особенности течения металла.

В зоне деформации штыря №2 наблюдается подпор металла за счет стесняющего действия формовочного кольца и перетекание металла из ступицы со стороны верхнего штампа. Со стороны нижнего штампа (штырь №5) деформация по высоте заготовки значительно больше (рисунок 2.8).

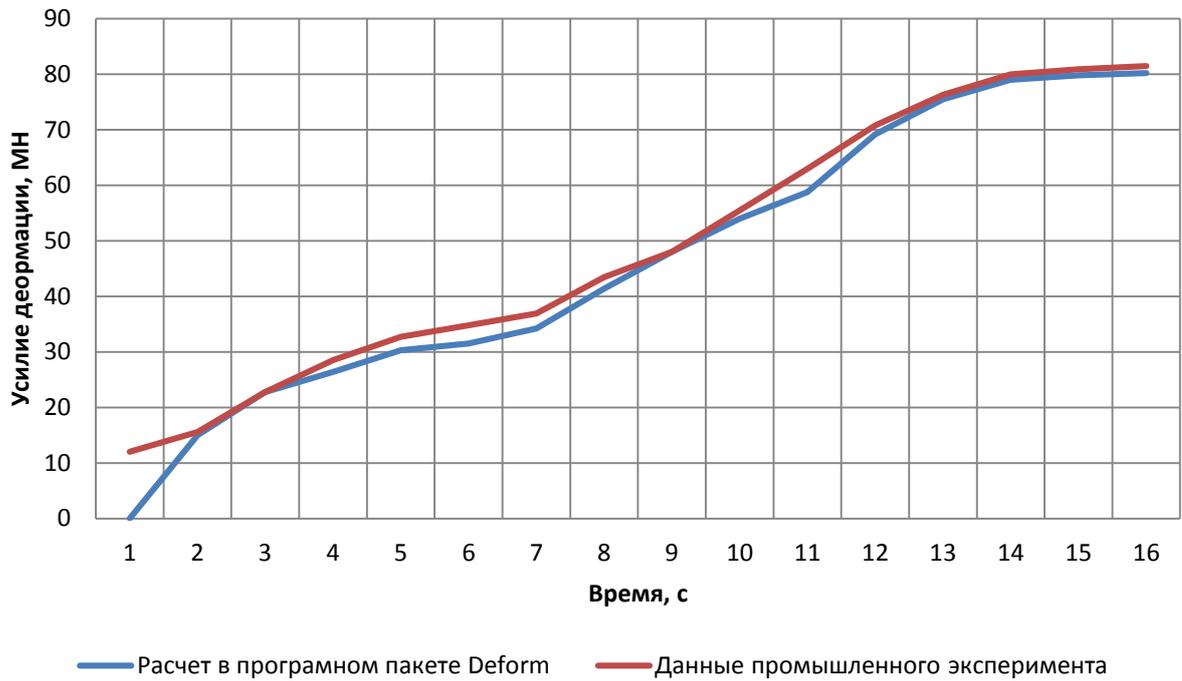
Штырь №6 смещается по торцевой поверхности меньше, чем штырь №3, относительно своего положения после пресса R-5000. Это происходит вследствие того, что в первую очередь происходит заполнение гравюры нижнего штампа, а только потом зоны в области штыря №3. Крайний вертикальный штырь (№6) перемещаясь на боковую поверхность обода, сближается с радиальным штырем №9 относительно своего первоначального положения после пресса R-5000, а штырь №3 перемещается только до области перехода яблока обода по наружной поверхности, также сближаясь с радиальным штырем №7. Сближение радиальных и вертикальных штырей подтверждает, что постоянно происходит подпор металла со стороны формовочного кольца, так как обод колеса формируется в стесненных условиях.

Перемещение центрального радиального штыря №8 (рисунок 2.8) свидетельствует о том, что металл из центральной зоны перемещается в зону формирования гребня, то есть происходит перераспределение объемов металла.

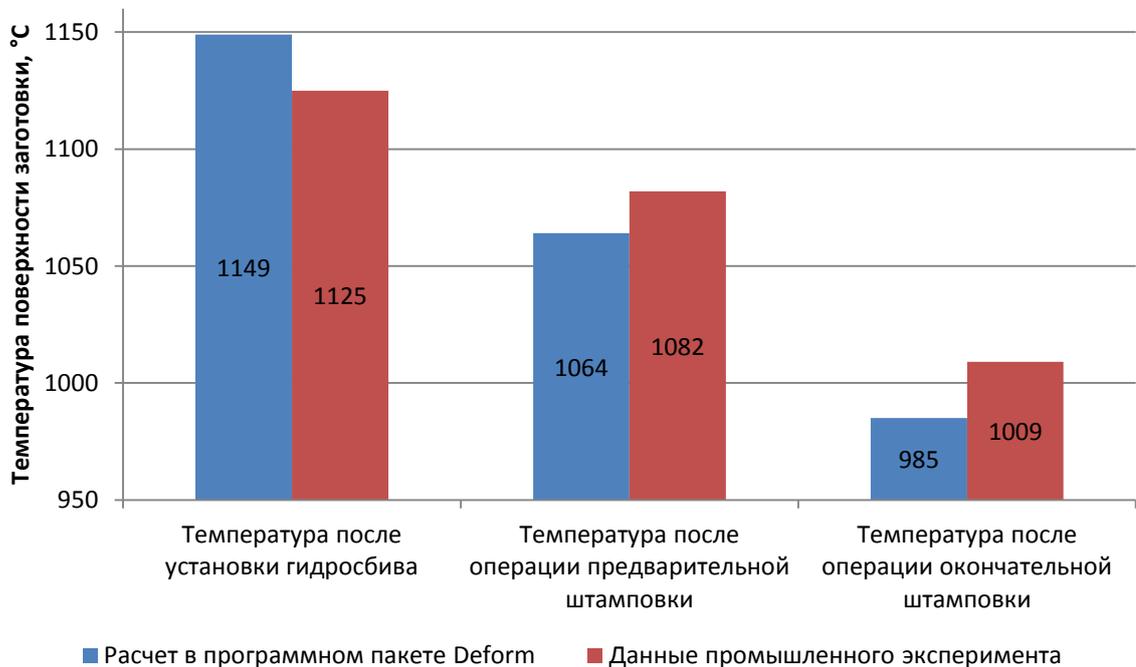
На основе выше приведенного анализа следует, что в нескольких зонах идет перетекание металла, что приводит к увеличению усилия деформации, а вследствие этого к дополнительному расходу энергии и повышенному износу штампов.

Сравнение технологических параметров процесса штамповки и формоизменения, полученных на основе результатов компьютерного моделирования и промышленного эксперимента со штыревой моделью показало сходимость результатов в пределах 5 %, что свидетельствует о точной постановке начальных и граничных условий процесса. На рисунке 2.9 показана сходимость

результатов опытного производства с результатами компьютерного моделирования.



а



б

Рисунок 2.9 - Сходимость результатов моделирования и промышленного эксперимента (а – сходимость по усилию деформации, б – сходимость по температуре заготовки)

Таким образом, получена математическая модель, с начальными и граничными условиями, обеспечивающая высокую сходимость результатов компьютерного моделирования с промышленными данными. Данную модель целесообразно использовать при анализе вновь разрабатываемых калибровок при освоении и постановке на производство новой продукции колесобандажного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК».

### **2.3. Анализ альтернативных схем предварительной штамповки**

Действующая технология предварительной штамповки, реализуемая на ОА «ЕВРАЗ НТМК» не обеспечивает разгонку металла, как операцию, необходимую для распределения металла между центральной и периферийной частями штампованной поковки. Создаются условия неравномерного распределения металла по сечению заготовки. Таким образом, если в первую очередь происходит заполнение металлом области штампов в зоне ступицы, то это приводит к увеличению силы окончательной штамповки, а также затрудняет качественное формирование обода и гребня. Если в первую очередь происходит заполнение области штампов в зоне обода, то это может привести к невыполнению профиля ступицы. Таким образом, операция окончательной штамповки должна осуществляться с учетом положения нейтрального сечения и создания рациональных потоков металла, при которых наблюдается практически одновременное заполнение области ступицы и обода, в последний момент штамповки. Для реализации поставленной задачи требуется знать действительное положение нейтрального сечения  $R_n$  и его положение в последний момент операции окончательной штамповки (рисунок 2.10).

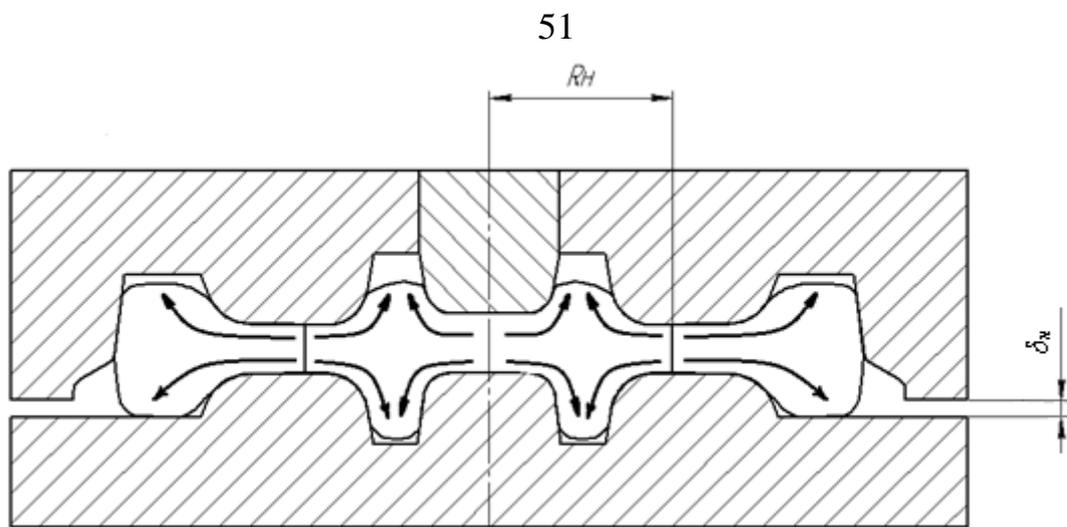


Рисунок 2.10 – Положение нейтрального сечения во время операции окончательной штамповки

В работах [110, 114, 117-121] показано, что схемы штамповки, которые обеспечивают распределение металла между центральной и периферийной частями штампованной поковки, характеризуются снижением силы штамповки на прессе, при операции окончательной штамповки. Величина усилий в этом случае составляет 63 - 70 % от величины усилий при деформации заготовки, полученной по технологии с использованием плоских плит в операции предварительной штамповки по действующей технологии. Исключение преждевременного заполнения ступицы способствует снижению средней величины износа штампов на 20 - 24 % при операции окончательной штамповки.

В данном разделе рассмотрены особенности и проведено моделирование альтернативных способов предварительной штамповки, которые обеспечивают разгонку металла.

Специалистами АО «ЕВРАЗ НТМК» совместно с Уральским Федеральным Университетом был разработан новый способ предварительной штамповки [61], обеспечивающий помимо разгонки металла, дополнительную центровку штампованной поковки при операции окончательной штамповки за счет формирования элемента сопряжения, который обеспечивается верхним инструментом деформации (рисунок 2.11).

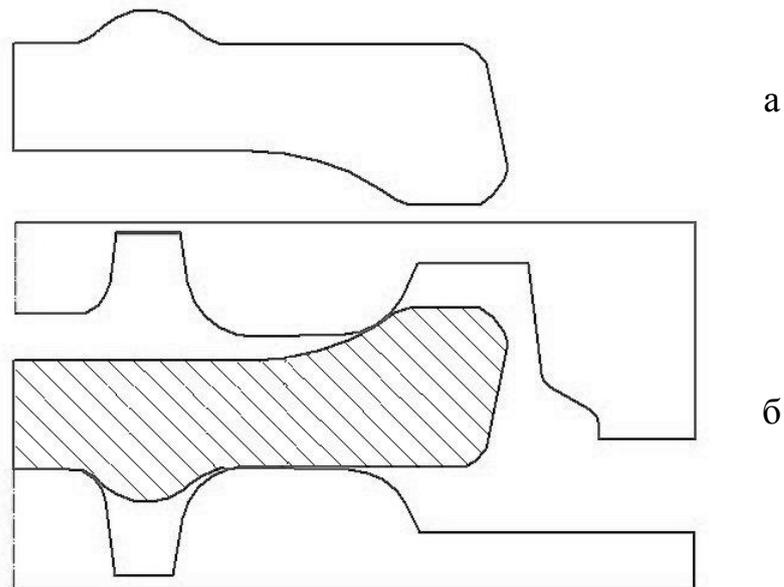


Рисунок 2.11 – Профиль заготовки после операции предварительной штамповки (а) и ее позиционирование при окончательной штамповке (б) по варианту 1

Нижний штамп, в операции предварительной штамповки, является плоским в центральной части, имеет кольцевой ручей по наружному контуру. Верхний штамп прессы R-5000 имеет кольцевой ручей со средним диаметром, равным среднему диаметру ступицы черного колеса. В процессе предварительной штамповки на верхней торцевой поверхности поковки образуется симметричный элемент в виде полутора, поверхность которого выполняется из условия сопряжения со ступичным пазом на нижнем штампе прессы R-9000 (рисунок 2.11).

При кантовке штампованной поковки на  $180^\circ$ , элемент в виде полутора способствует центровке черновой поковки на нижнем штампе прессы R-9000. Инструмент деформации прессы R-5000, также имеет неподвижное калибровочное кольцо, установленное соосно верхнему штампу. Калибровочное кольцо формирует торцевую поверхность поковки по наружному диаметру и при правильной настройке прессы обеспечивает равномерное по периметру штампованной поковки распределение металла.

Для технологической схемы (далее – вариант 1) характерна двухсторонняя разгонка металла, поскольку обеспечивается течение металла, как на верхнем, так

и на нижнем торце заготовки, которое осуществляется за счет кольцевых ручьев, выполненных на нижнем и верхнем инструменте деформации.

Другим альтернативным способом технологии предварительной штамповки является модернизация предыдущего способа, которая представлена на рисунке 2.12.

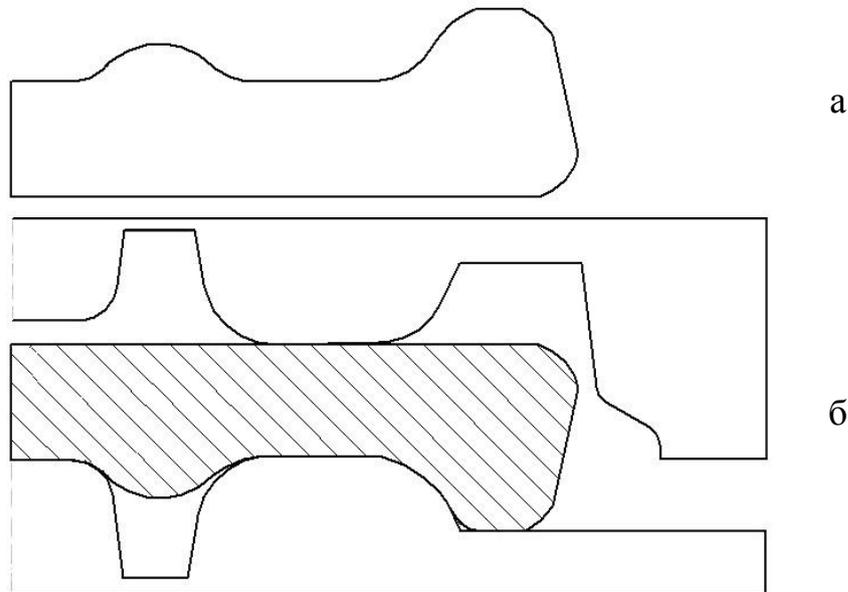


Рисунок 2.12 – Профиль заготовки после операции предварительной штамповки (а) и ее позиционирование при окончательной штамповке (б) по варианту 2

Нижний штамп, в операции предварительной штамповки, является полностью плоским. Верхний штамп прессы R-5000 имеет кольцевой ручей со средним диаметром, равным среднему диаметру ступицы черного колеса, а также формируется дополнительный элемент в периферийной части заготовки, наличие которого позволяет уменьшить толщину поковки в области диска, а также более надежно обеспечить центрирование заготовки при укладке на нижнем штампе прессы R-9000.

Для данной технологической схемы (далее – вариант 2) характерна только односторонняя разгонка металла, поскольку течение металла обеспечивается только на верхнем торце заготовки.

Произведена оценка распределения металла по элементам колеса. Для этого в графическом пакете построена поковка, получаемая после операции окончательной штамповки (рисунок 2.13) с последующим разбиением ее на

составляющие части: перемычка, ступица, диск и обод. Как видно из таблицы 2.4, наибольший объем поковки представляет обод колеса, а наименьший перемычка. Таким образом, можно сделать вывод, что при производстве колес преимущества имеют такие схемы предварительной штамповки на прессе R-5000, где осуществляется разгонка металла в часть обода колеса, с целью уменьшения энергосиловых параметров штамповки на прессе R-9000.

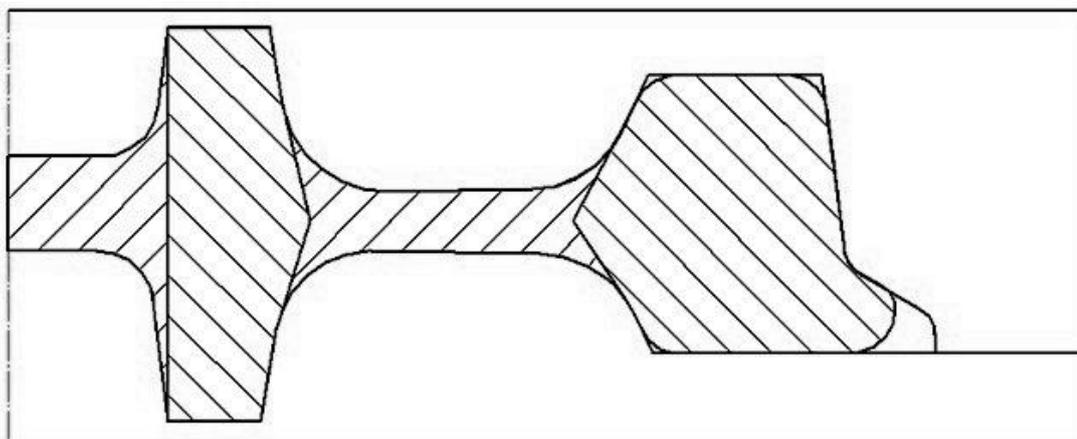


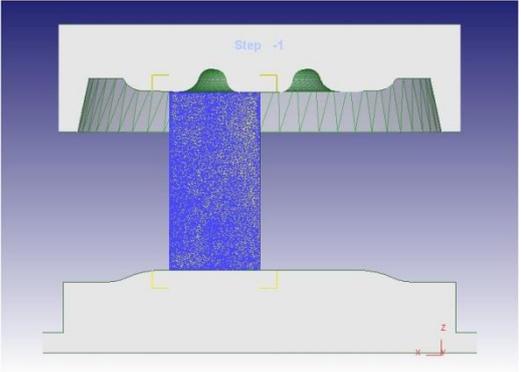
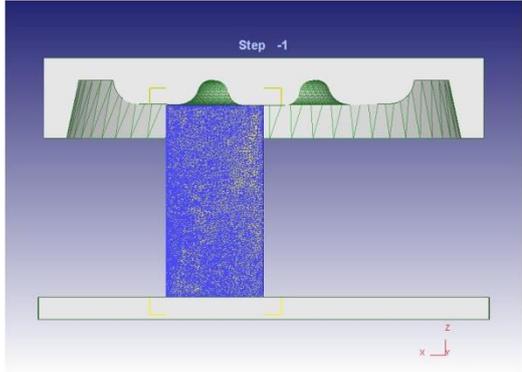
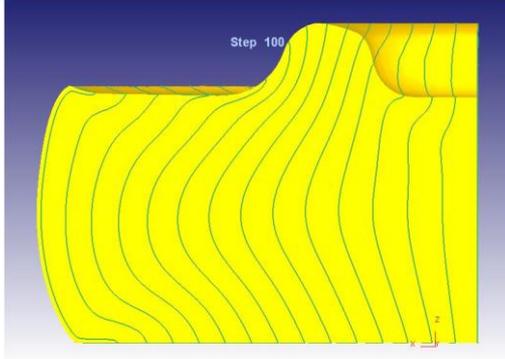
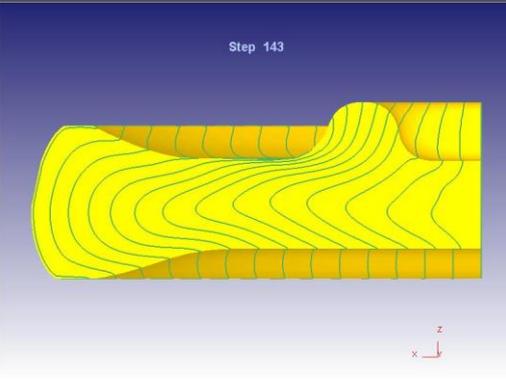
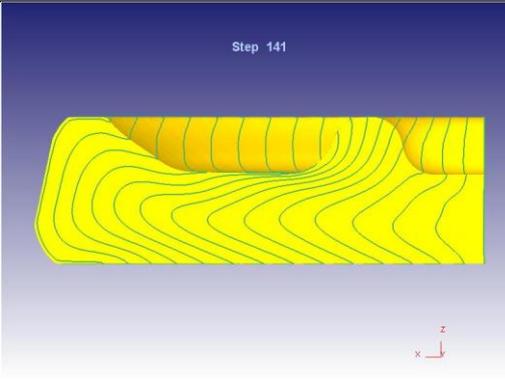
Рисунок 2.13 – Профиль поковки после операции окончательной штамповки

Таблица 2.4 – Распределение объема металла по элементам заготовки

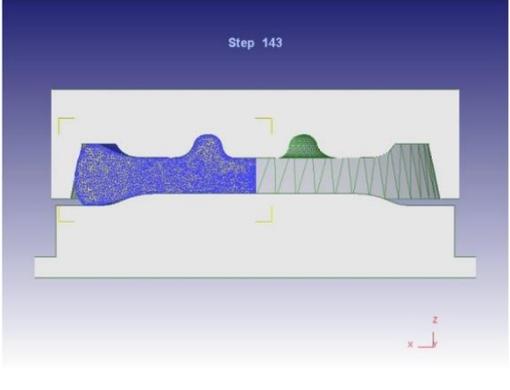
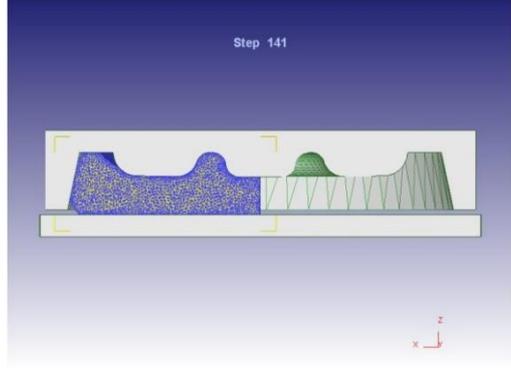
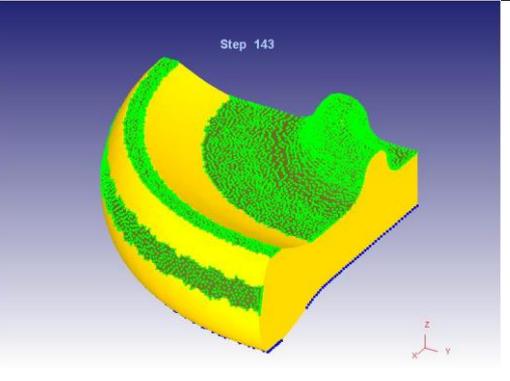
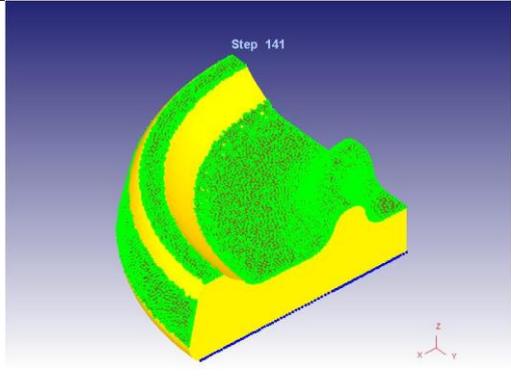
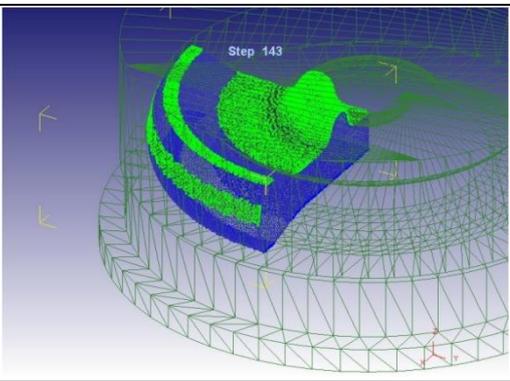
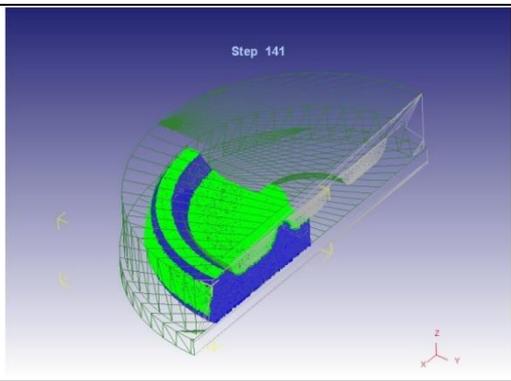
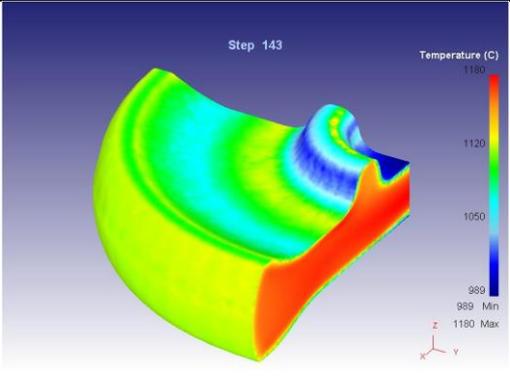
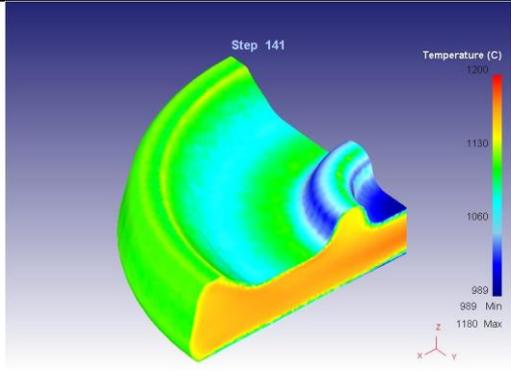
Элемент заготовки	Масса, кг (%)	Объем, м <sup>3</sup>
Чистовая поковка	489 (100)	0,0623
- перемычка	12 (2,5)	0,0016
- ступица	77 (15,7)	0,0097
- диск	59 (12)	0,0075
- обод	341 (69,8)	0,0435

Для рассмотренных схем предварительной штамповки проведено компьютерное моделирование в программном пакете Deform для сектора заготовки, имеющего угол 90°. Основные этапы операции предварительной штамповки представлены в таблице 2.5, основные этапы операции окончательной штамповки представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Основные этапы моделирования операции предварительной штамповки

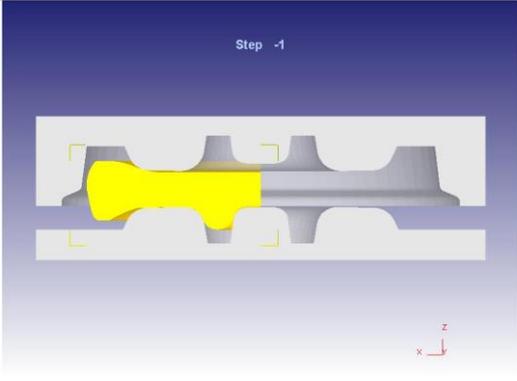
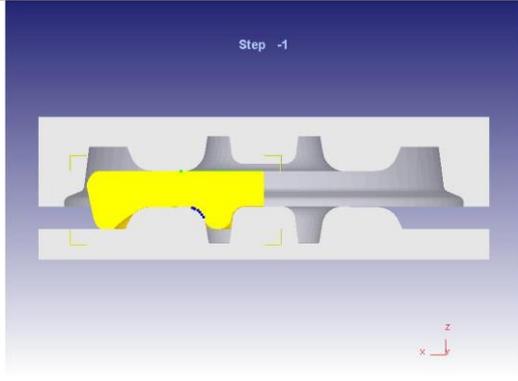
Вариант 1	Вариант 2
1	2
<b>Позиционирование заготовки и инструмента деформации</b>	
	
<b>Течение металла</b>	
	
	

Окончание таблицы 2.5

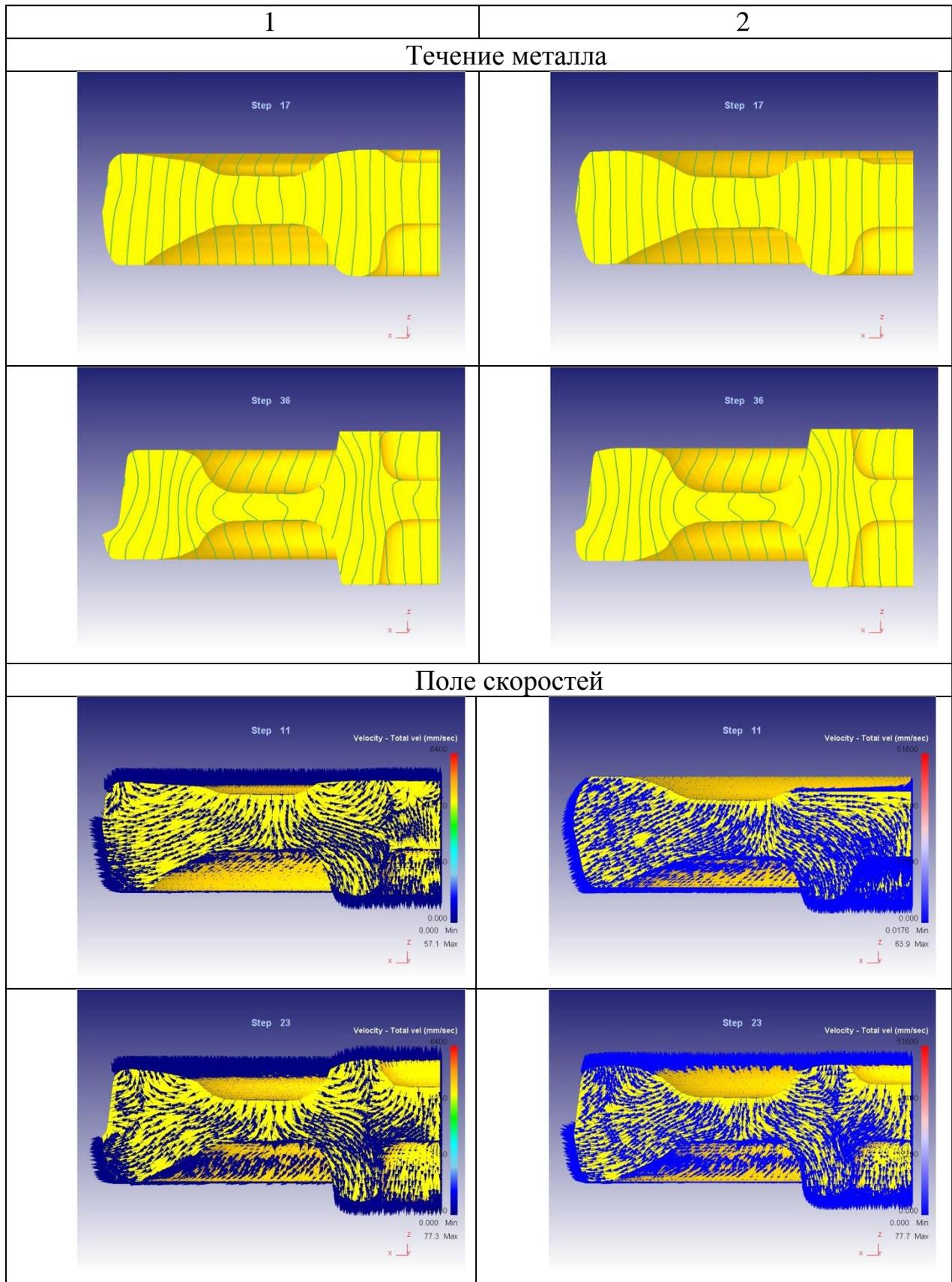
1	2
<b>Заполнение калибра</b>	
 <p>Step 143</p>	 <p>Step 141</p>
<b>Контакт заготовки с инструментом деформации в конце операции предварительной штамповки</b>	
 <p>Step 143</p>	 <p>Step 141</p>
 <p>Step 143</p>	 <p>Step 141</p>
<b>Распределение поля температур</b>	
 <p>Step 143</p> <p>Temperature (C)</p> <p>1190</p> <p>1120</p> <p>1050</p> <p>989</p> <p>989 Min</p> <p>1190 Max</p>	 <p>Step 141</p> <p>Temperature (C)</p> <p>1200</p> <p>1130</p> <p>1060</p> <p>989</p> <p>989 Min</p> <p>1180 Max</p>

Для рассматриваемых схем предварительной штамповки, на первой стадии при осадке, на верхнем торце заготовки формируется выступ в виде полутора, ось которого совпадает с осью области ступицы нижнего штампа прессы R-9000. Стоит отметить, что на первой стадии осуществляется разгонка металла и формируется обод заготовки черного колеса. Вторая стадия предварительной штамповки начинается с момента соприкосновения боковой поверхности поковки с калибровочным кольцом и характеризуется односторонним течением металла до момента завершения формирования поковки в калибровочном кольце таким образом, что ширина контакта кольца с поковкой становится одинаковой по периметру поковки. С этого момента начинается третья стадия штамповки с осесимметричной деформацией, сопровождаемой уменьшением высоты заготовки и увеличением ширины контакта с калибровочным кольцом. В результате образуется осесимметричная поковка, которая центрируется после кантовки заготовки на  $180^\circ$  с помощью выступа на торцевой поверхности при операции окончательной штамповки.

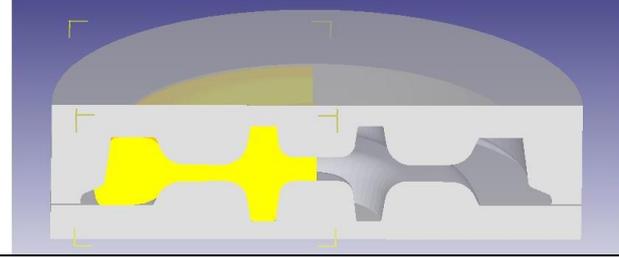
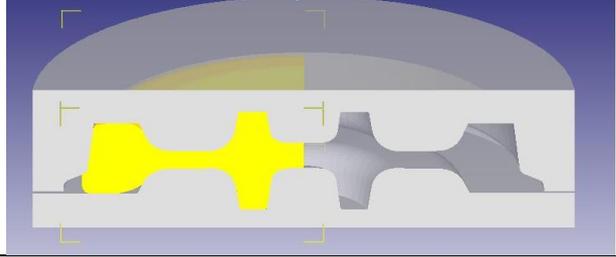
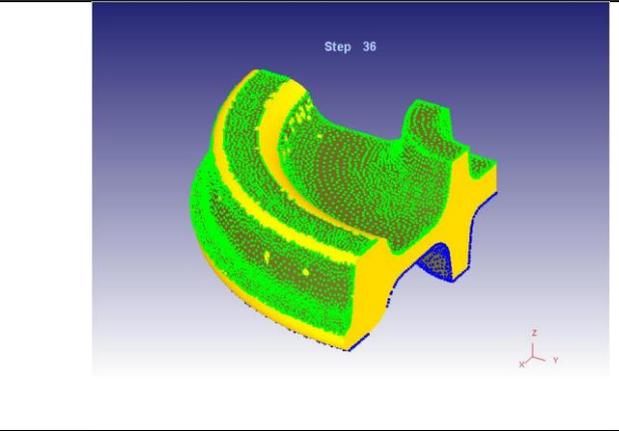
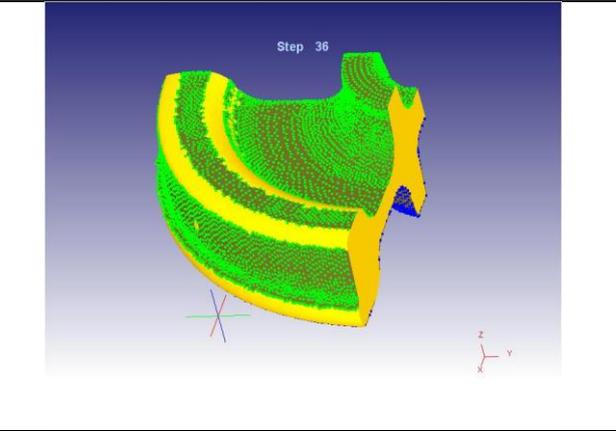
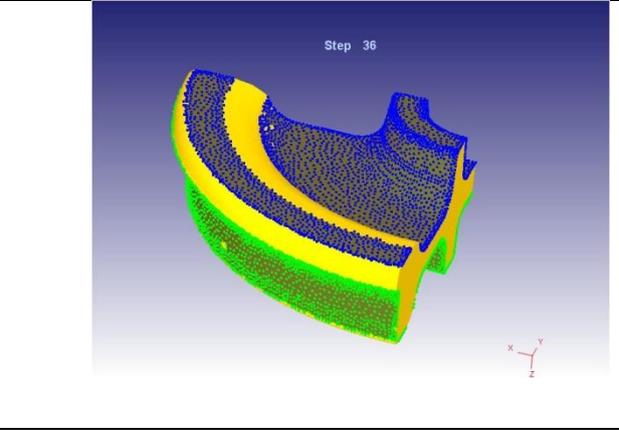
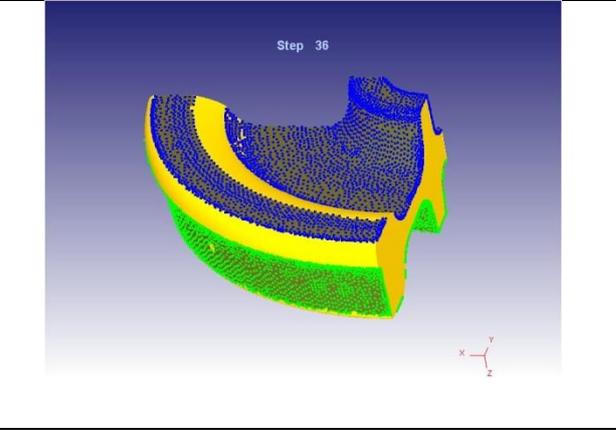
Таблица 2.6 – Основные этапы моделирования операции окончательной штамповки

Вариант 1	Вариант 2
1	2
Позиционирование заготовки и инструмента деформации	
	

## Продолжение таблицы 2.6



## Окончание таблицы 2.6

1	2
Заполнение калибра	
	
Контакт заготовки с инструментом деформации в конце операции окончательной штамповки	
	
	

На основе данных, представленных в таблице 2.6, можно сделать вывод, что наилучшим вариантом с точки зрения самоцентрирования заготовки на нижнем штампе прессы R-9000 является второй вариант. В данной технологии элемент в виде полутора, а также частичное формирование обода, выполняемое из условия сопряжения с периферийной частью штампов при окончательной штамповке, позволяет уменьшить толщину поковки в области диска, и обеспечить более точное позиционирование заготовки при укладке на нижнем штампе прессы R-9000.

Стоит отметить, что действующая технология не имеет поверхностей, способствующих самоцентрированию заготовки, поэтому укладка такой заготовки полностью зависит от точности работы робота-манипулятора центрователей прессы R-9000

Из рассмотренных вариантов предварительной штамповки, деформация по первому способу показала наилучшие показатели по силовым параметрам и формоизменению заготовки при окончательной штамповке. В таблице 2.7 представлены технологические параметры окончательной штамповки, полученные при моделировании в программном пакете Deform в сравнении с действующей технологией.

Таблиц 2.7 - Технологические параметры предварительной и окончательной штамповки, полученные на основе моделирования

Технология предварительной и окончательной штамповки	Операция штамповки	Усилие штамповки, МН	Выполнение элементов заготовки		
			Обод	Ступица	Гребень
Действующая технология	Предварительная	46,0	-	-	-
	Окончательная	80,2	частично	да	да
Вариант 1	Предварительная	41,2	да	да	-
	Окончательная	57,1	да	да	да
Вариант 2	Предварительная	38,5	частично	да	-
	Окончательная	72,3	частично	да	частично

Для рассмотренных схем предварительной штамповки проведен анализ влияния геометрических параметров поковки на положение нейтрального сечения.

#### **2.4. Анализ влияния геометрических параметров поковки на положение нейтрального сечения**

Одним из важных показателей процесса окончательной штамповки является величина недоштамповки  $\delta_n$ , при которой радиус нейтрального сечения становится равным нулю  $R_n = 0$ . Основываясь на показателе недоштамповки  $\delta_n$ , можно сделать вывод о рациональности разработанной калибровки, с точки зрения равномерного заполнения полостей обода и ступицы поковки, что в свою очередь влияет на энергосиловые параметры процесса окончательной штамповки.

Оптимальное значение недоштамповки при котором радиус нейтрального сечения становится равным нулю  $R_n = 0$ , является  $\delta_n \sim 2$  мм, что обеспечивает полное заполнение области ступицы поковки и конец операции окончательной штамповки при  $\delta_n = 0$ . Если значение недоштамповки  $\delta_n > 2$  мм, а радиус нейтрального сечения становится равным нулю  $R_n = 0$ , то с этого момента радиальная составляющая скорости на поверхности контакта с инструментом и в объеме больше нуля, в этот момент возрастают усилия штамповки, и затрудняется качественное формирование обода и гребня при окончательной штамповке. Создаются условия неравномерного распределения массы по периметру колеса. Таким образом, при проектировании инструмента деформации для операции предварительной штамповки требуется получить равенство масс элементов штампованной поковки относительно нейтрального сечения в операции окончательной штамповки  $m_1 = m_3$  и  $m_2 = m_4$  (рисунок 2.14), что позволит получить минимальное значение величины недоштамповки  $\delta_n$ , при которой радиус нейтрального сечения становится равным нулю  $R_n = 0$ .

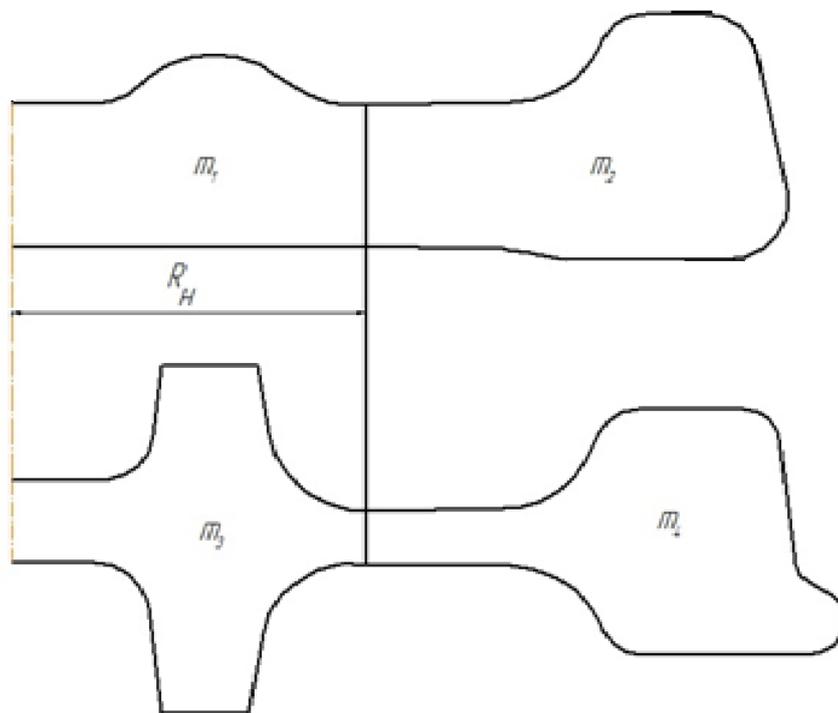


Рисунок 2.14 – Элементы штампованной поковки

Для анализа влияния геометрических параметров штампованной поковки, полученной при предварительной штамповке, на положение нейтрального сечения

во время операции окончательной штамповки, проведено компьютерное моделирование в программном комплексе Deform [69,70]. Моделирование выполнено для шести семи схем предварительной штамповки: для действующей технологии и для шести вариантов штамповки с обеспечением разгонки.

В качестве варьируемых геометрических параметров были определены: величина разгонки  $S = S_1 + S_2$ , высота штампованной поковки  $h$  и их соотношение –  $S/h$  (рисунок 2.15). Изменение величин происходило в следующих диапазонах:  $0 \leq S \leq 80$  мм,  $110 \leq h \leq 160$  мм, их соотношения –  $0 \leq S/h \leq 0,53$ .

Основной целью было определить влияние схемы штамповки с различным соотношением  $S/h$  на положение нейтрального сечения  $R_n$  при завершающей стадии операции окончательной штамповки с регистрированием величины недоштамповки  $\delta_n$ . Фиксирование положения нейтрального сечения  $R_n$  производилось с шагом равным 1,0 мм перемещения верхнего инструмента деформации.

Влияние изменения величины радиуса поковки  $R$  на положение нейтрального сечения не исследовалось, в связи с малым диапазоном варьирования данного параметра, связанного с конструктивной особенностью штамповой оснастки (отсутствие возможности установки формовочного кольца большего диаметра для обеспечения необходимого зазора между конусной частью штампованной поковки после кантовки и формовочным кольцом прессы R 9000).

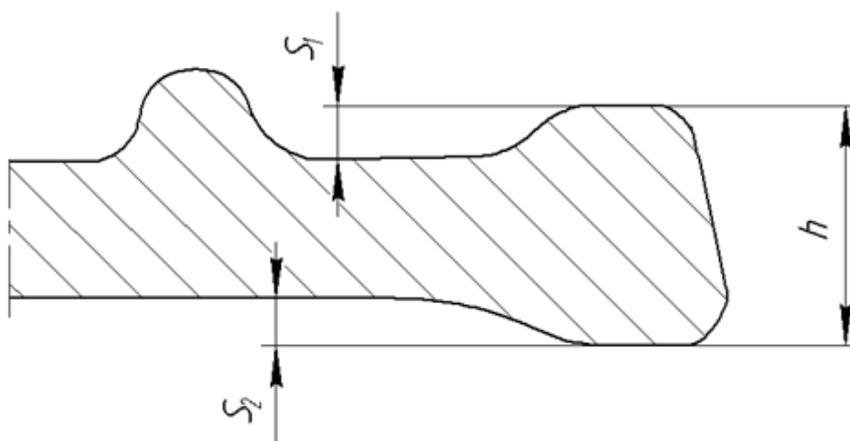


Рисунок 2.15 – Геометрические параметры штампованной поковки

Анализируя полученные результаты зависимости формы черновой поковки на положение нейтрального сечения, отметим следующее: во время процесса окончательной штамповки, для каждого варианта моделирования, радиус нейтрального сечения  $R_n$  изменяется в диапазоне от 210 мм до 220 мм. Далее видно снижение значения  $R_n$  до 0, для вариантов, при которых значение  $S/h$  находится в диапазоне  $0,25 \leq S/h \leq 0,45$ , что означает заполнение металлом области ступицы (рисунок 2.16). Для опытов, при которых значение  $S/h > 0,45$ , радиус нейтрального сечения  $R_n \neq 0$  в конце операции окончательной штамповки ( $\delta_n = 0$ ), что означает не заполнение области ступицы. Таким образом, при проектировании калибровки инструмента деформации для операции предварительной штамповки, нейтральное сечение радиусом 210 – 220 мм, обеспечит равенство масс элементов штампованной поковки  $m1=m3$  и  $m2=m4$  (рисунок 2.14), относительно нейтрального сечения в операции окончательной штамповки.

Формоизменение заготовки и положение нейтрального сечения в конце операции окончательной штамповки при различном соотношении  $S/h$  представлено в таблице 2.8.

Значение, при котором  $S/h = 0$ , соответствует технологической схеме предварительной штамповки без осуществления разгонки, то есть действующей схеме деформации заготовки между плоскими плитами в подвижном калибровочном кольце. По результатам моделирования для данной схемы, при недоштамповке  $\delta_n = 7-8$  мм завершается оформление ступицы, радиус нейтрального сечения  $R_n = 0$ , весь металл перемещается к ободу поковки, с этого момента возрастает сила штамповки.

На основе моделирования, для отношения  $S/h$  получен диапазон значений  $0,40 \leq S/h \leq 0,45$ , при котором в момент исчезновения нейтрального сечения по диску ( $R_n = 0$ ), величина недоштамповки минимальна и составляет  $\delta_n = 1-2$  мм в последний момент операции окончательной штамповки.

При увеличении значения отношения  $S/h \geq 0,50$  металл продолжает заполнять область ступицы и обода до конца операции окончательной штамповки,  $R_n \neq 0$ , происходит не выполнение профиля ступицы.

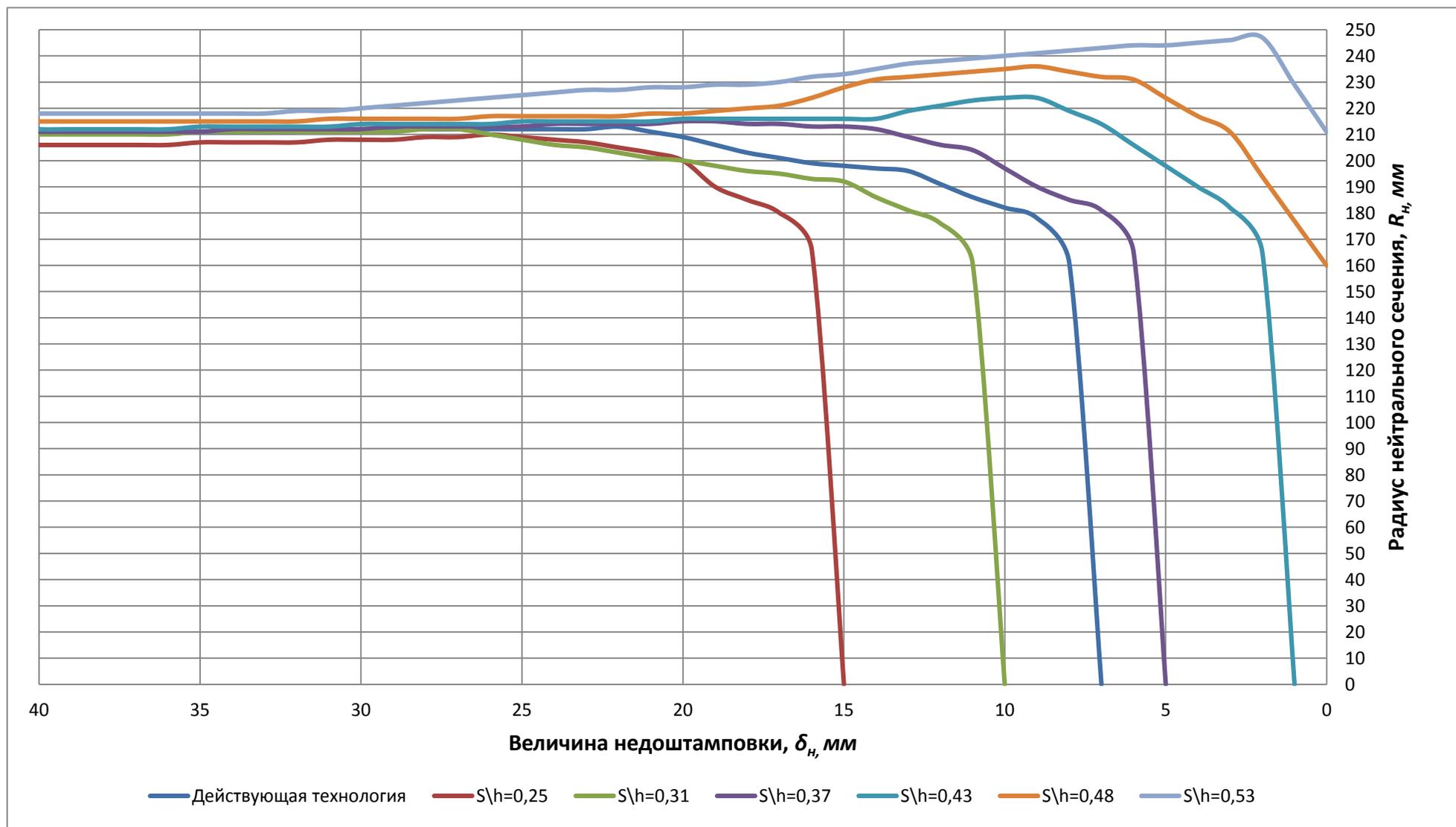
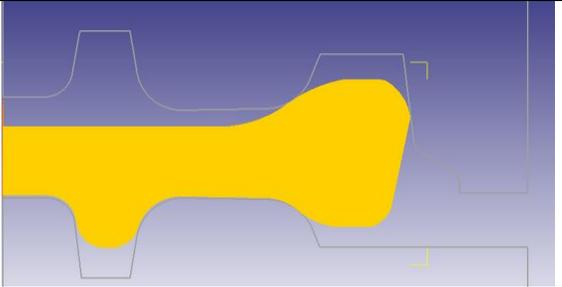
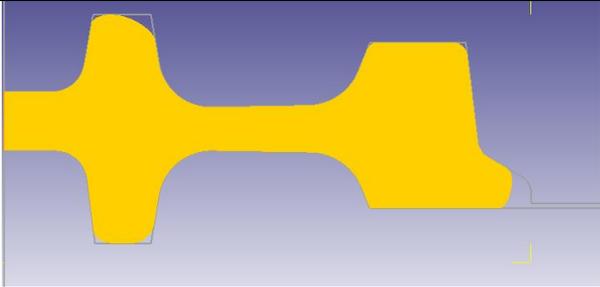
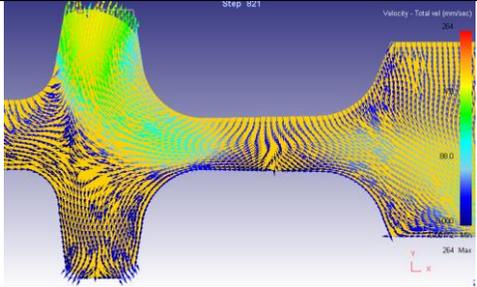
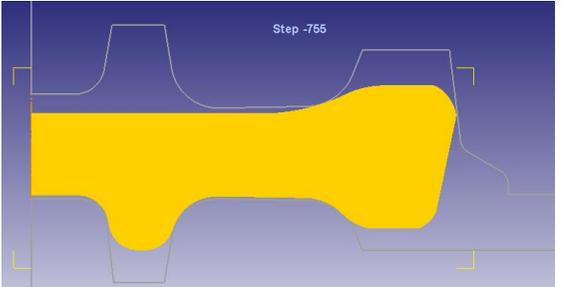
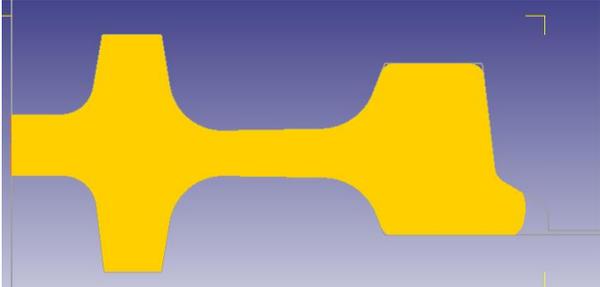
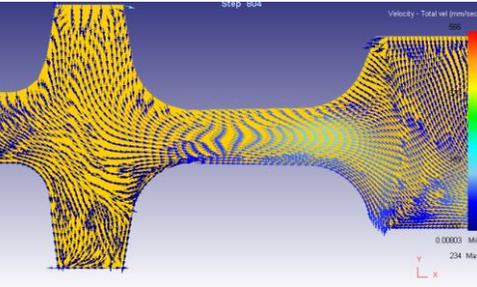
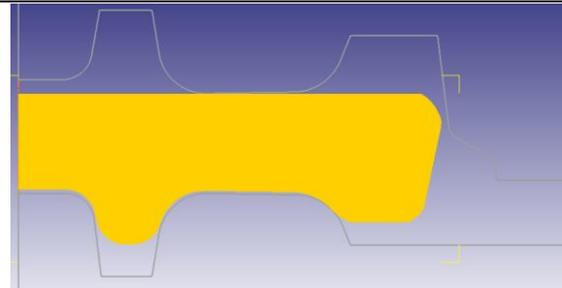
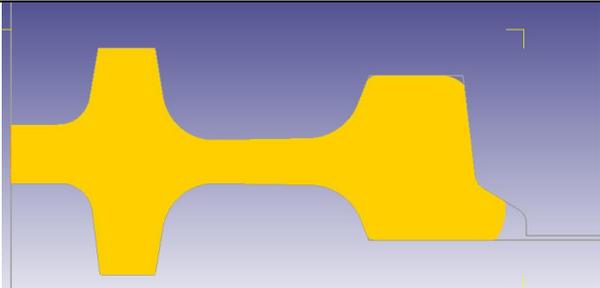
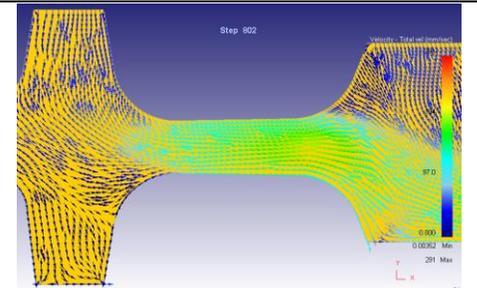


Рисунок 2.16 – Влияние геометрических параметров поковки на положение нейтрального сечения

Таблица 2.8 – Формоизменение и положение нейтрального сечения при различном соотношении  $S/h$

Начало операции окончательной штамповки	Процесс окончательной штамповки при $\delta_n = 2\text{мм}$	Положение нейтрального сечения в последний момент окончательной штамповки
$S/h = 0,53$		
		
$S/h = 0,43$		
		
$S/h = 0,31$		
		

## 2.5. Выводы по разделу

1. Проведен промышленный эксперимент со штыревой моделью. Определены закономерности течения металла, уточнены начальные и граничные условия процессов предварительной и окончательной штамповки.

2. На основе компьютерного моделирования и промышленного эксперимента определены значения показателя трения для условий контактного взаимодействия заготовки с инструментом деформации в операциях предварительной и окончательной штамповки при наличии графитовой технологической смазки.

3. На основе уточненных начальных и граничных условий разработана компьютерная модель, используемая при анализе вновь разрабатываемых калибровок и совершенствовании существующих, обеспечивающая высокую сходимость результатов компьютерного моделирования и промышленных данных.

4. Разработаны калибровки инструмента деформации для альтернативных способов предварительной штамповки, которые обеспечивают разгонку металла. Проведено компьютерное моделирование, на основе которого установлено, что при выполнении операции разгонки на этапе предварительной штамповки, при последующей окончательной штамповке, зафиксированы наилучшие показатели силовых параметров процесса, без ухудшения формирования элементов черного колеса.

5. Выполнен анализ влияния геометрических параметров поковки на положение нейтрального сечения, для технологической схемы, обеспечивающей разгонку металла при предварительной штамповке. Подготовлены рекомендации по выбору оптимальных соотношений геометрических параметров поковки, обеспечивающие рациональные потоки металла при окончательной штамповке.

### 3. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ СПОСОБА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ШТАМПОВКИ С РАЗГОНКОЙ МЕТАЛЛА

#### 3.1. Подготовка и проведение прокатки опытной партии заготовок

Для промышленной проверки эффективности выполнения операции разгонки при проведении предварительной штамповки, с целью повышения стабильности технологического процесса, оптимизации массы штучной заготовки под прокатку и снижения энергосиловых параметров работы прессы R-9000, подготовлена программа опытно-промышленных работ ОПР №ОПРНТ 16/0084 «Отработка калибровки для производства колес Ø 957 мм по ГОСТ 10791-2011 (чертеж 00186269-162)» (Приложение 1). Работа проведена в несколько этапов в течение 2016-2018 г.г.

Расчет калибровки инструмента деформации для прессы R-5000 и разработка чертежей, выполнены на основе рекомендаций, изложенных в разделе 2, по выбору оптимальных соотношений геометрических параметров поковки, направленных на достижение рациональных потоков металла при операции окончательной штамповки (для отношения  $S/h$  диапазон значений  $0,40 \leq S/h \leq 0,45$ ).

В соответствии с программой опытно-промышленных работ были сформированы и прокатаны две партии заготовок: сравнительная партия, объемом 30 штук по действующей технологической схеме и опытная партия, объемом 30 штук с применением способа предварительной штамповки на прессе R-5000, обеспечивающим разгонку металла (рисунок 3.1), который совмещает в себе преимущества двух альтернативных схем предварительной штамповки, рассмотренных в разделе 2.

Порезка непрерывно-литых заготовок на штучные заготовки для производства сравнительной и опытной партии, а также порезка настроечных заготовок в количестве 13 штук, производилась на одной пиле холодной резки с последующим составлением протокола порезки. Для каждой штучной заготовки фиксировались такие параметры как: вес, длина, диаметр и овальность заготовки,

а также и косина реза. Результаты замеров заготовок для производства сравнительной и опытной партий представлены в таблице 3.1.

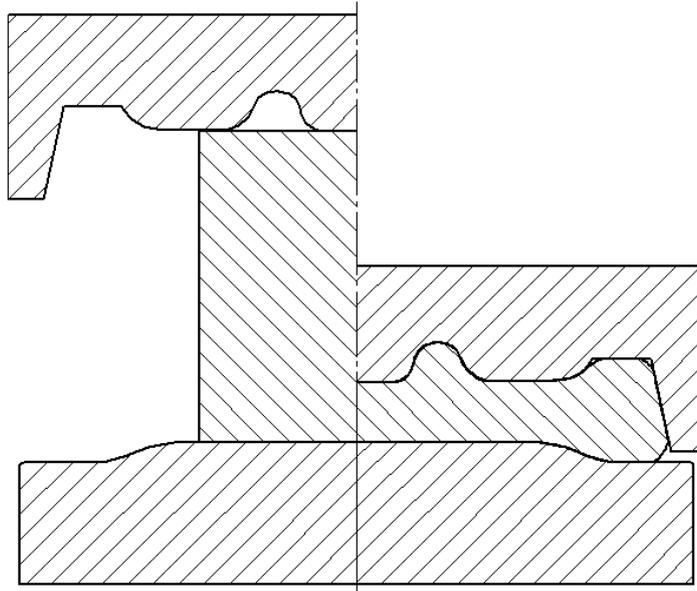


Рисунок 3.1 – Инструмент деформации и схема предварительной штамповки для производства опытной партии

Таблица 3.1 – Результаты контроля порезки штучных заготовок

Параметр	Масса заготовки, кг	Длина заготовки, мм	Диаметр заготовки, мм	Овальность заготовки, мм	Косина реза, мм
<b>Требование технологической документации</b>	<b><math>489^{+3}_{-1}</math></b>	<b><math>428 \pm 3</math></b>	<b><math>430 \pm 3</math></b>	<b>не более 5</b>	<b>не более 6</b>
Настрочные заготовки (количество 12 шт.)					
Минимальное значение	489	428	430	0	0
Максимальное значение	491,5	430	432	1	2
Разница	2,5	2	2	1	2
Сравнительная партия (количество 30 шт.)					
Минимальное значение	488	428	431	0	0
Максимальное значение	491,5	430	433	2	2
Разница	3,5	2	2	2	2
Опытная партия (количество 30 шт.)					
Минимальное значение	488	427	430	0	0
Максимальное значение	491	430	433	2	2
Разница	3	3	3	2	2

Результаты контроля геометрических параметров штучных заготовок соответствуют установленным требованиям технологической документации к процессу производства железнодорожных колес.

Перед проведением горячих опробований на прессо-прокатной линии, были проведены подготовительные работы по центровке и настройке прессов R-5000 и R-9000.

Проведена работа по замене центрирующих роликов и настройка работы центрователей пресса R-5000 при помощи эталонной заготовки, с обеспечением соосности при позиционировании оси заготовки, относительно оси нижнего инструмента деформации. Выполнена проверка соосности верхнего и нижнего штампа на прессах R-5000 и R-9000 при помощи центровочных плит. После перечисленных мероприятий проведена прокатка настроечных заготовок с последующим снятием их с прессо-прокатной линии и измерением после охлаждения. При измерении были проконтролированы следующие параметры - разнотолщинность диска и разноширинность обода. Для пресса R-5000 значение разнотолщинности предварительно штампованной заготовки составило 0,5 мм, для пресса R-9000 значение разнотолщинности диска – 0,5 мм, разноширинности обода – 1,0 мм.

После завершения подготовительных работ по подготовке прессо-прокатной линии к проведению опытно-промышленной работы, была проведена прокатка сравнительной и опытной партии, по порядку порезки заготовок. Перед каждой партией годных заготовок, производилась настройка технологических параметров стана путем прокатки настроечных заготовок. Прокатка штучных заготовок производилась в соответствии с требованиями технологической документации.

### **3.2. Исследование и анализ результатов производства опытной партии**

Для исследования формоизменения заготовки при операциях предварительной и окончательной штамповки, был произведен отбор поковок (рисунок 3.2, 3.3), от настроечных заготовок, в количестве двух штук после

деформации на прессах R-5000 и R-9000 для последующего измерения геометрических параметров поковки.



Рисунок 3.2 – Фото поковки после операции предварительной штамповки (наружная сторона)



Рисунок 3.3 – Фото поковки после операции предварительной штамповки (внутренняя сторона)

Каждая поковка, снятая с пресо-прокатной линии, после предварительной и окончательной штамповки, была промерена в четырех плоскостях для оценки геометрических параметров (рисунок 3.4, 3.5) и отклонения формы поковок.

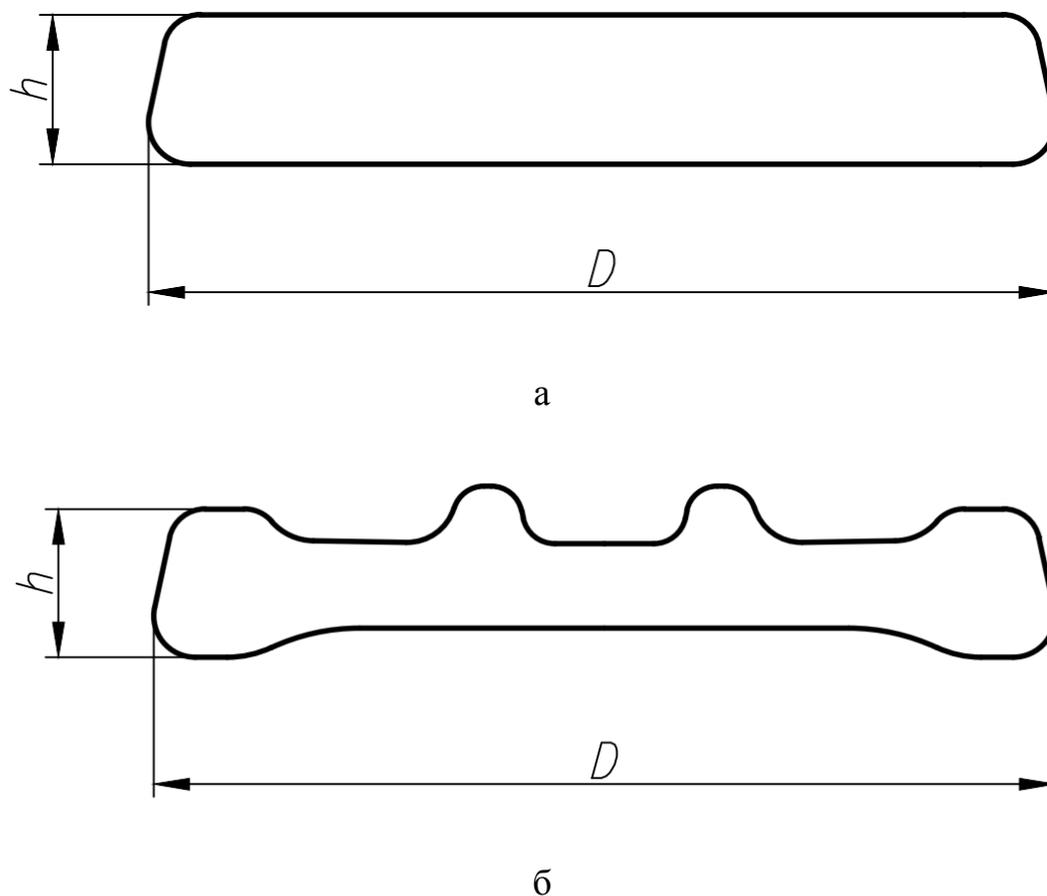


Рисунок 3.4 – Контролируемые геометрические параметры на поковках после предварительной штамповки (а – по действующей технологии, б – по опытной калибровке)

Результаты контроля геометрических параметров на поковках после предварительной штамповки представлены в таблице 3.2.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что отклонения геометрических параметров поковок, полученные в опытной партии, сопоставимы со значениями для сравнительной партии. Максимальное отклонение по диаметру поковки  $D$  для двух партий составило  $\Delta D = 3$  мм, по высоте поковки  $h - \Delta h = 1,5$  мм для опытной и  $\Delta h = 2$  мм для сравнительных партий.

Таблица 3.2 – Результаты замеров поковок после предварительной штамповки

Параметр	Опытная партия				Сравнительная партия			
	1 поковка		2 поковка		1 поковка		2 поковка	
	<i>D, мм</i>	<i>h, мм</i>	<i>D, мм</i>	<i>h, мм</i>	<i>D, мм</i>	<i>h, мм</i>	<i>D, мм</i>	<i>h, мм</i>
1-5	843	143,5	839	146	845	111	843	111
		145		147		112,5		113
2-6	843	144	841	146	842	112	845	111
		145		146		112		112,5
3-7	845	144	839	147	844	113	845	112
		145		146		111		111
4-8	846	145	841	146	842	113	842	113
		144		146		111		111
мин	843	143,5	839	146	842	111	842	111
макс	846	145	841	147	845	113	845	113
Δ	3	1,5	2	1	3	2	3	2

Результаты контроля геометрических параметров на поковках после окончательной штамповки представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты замеров поковок после окончательной штамповки

Параметр	Опытная партия						Сравнительная партия					
	1 поковка			2 поковка			1 поковка			2 поковка		
	<i>D, мм</i>	<i>h, мм</i>	<i>l, мм</i>	<i>D, мм</i>	<i>h, мм</i>	<i>l, мм</i>	<i>D, мм</i>	<i>h, мм</i>	<i>l, мм</i>	<i>D, мм</i>	<i>h, мм</i>	<i>l, мм</i>
1-5	887	152	52	890	152	58	908	151	23	907	151	16
		153	57,5		152	55		151	17		152	17
2-6	886	152	57	889	152	61	910	151	25	907	152	22
		153	55		153	53		151	0		151	0
3-7	887	152	49	890	152	61	906	151	12	905	151	12
		153	54		153	54		151,5	0		150	0
4-8	888	152	58	890	152	60	908	151	10	908	151	29
		153	55		153	61		151	0		150	0
мин	886	152	49	889	152	53	906	151	0	905	150	0
макс	888	153	58	890	153	61	910	151,5	25	908	152	29
Δ	2	1	9	1	1	8	4	0,5	25	3	2	29

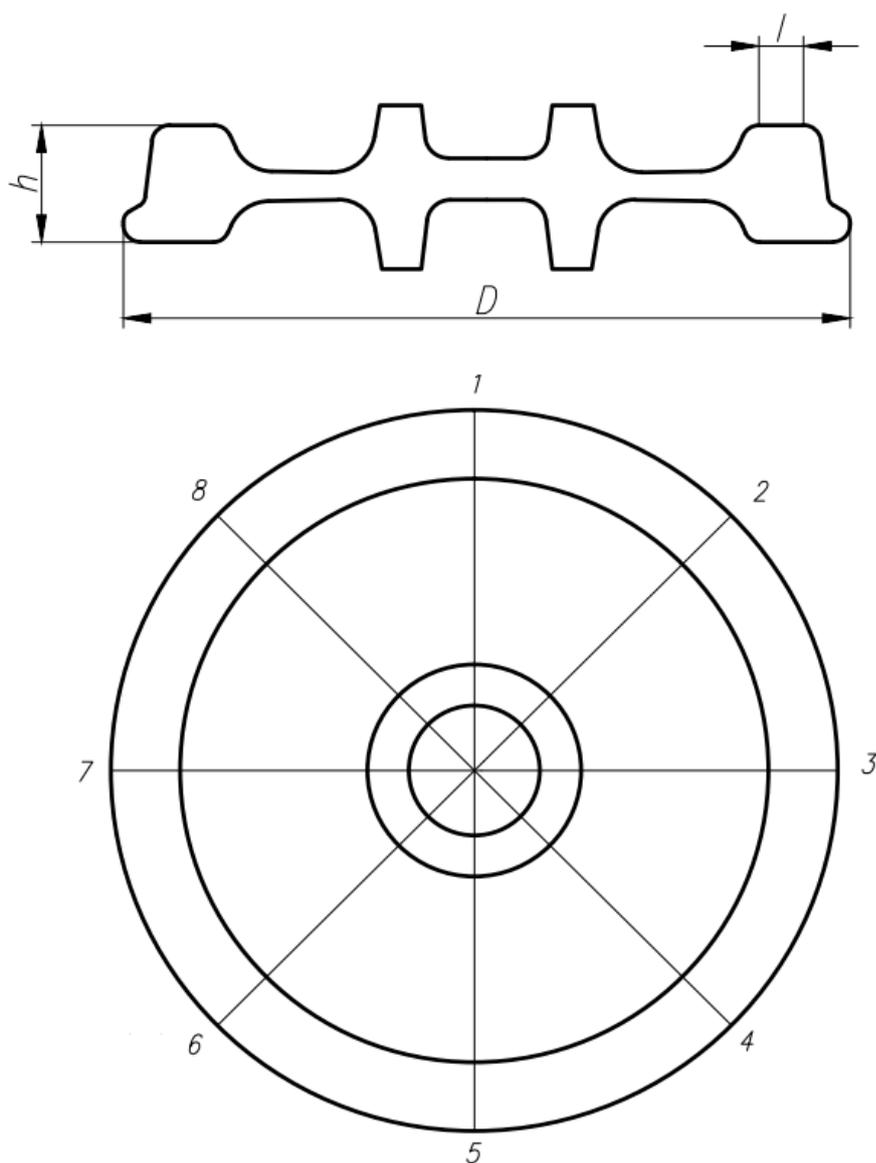


Рисунок 3.5 – Контролируемые геометрические параметры на поковках после окончательной штамповки

Анализ результатов замеров четырех поковок после операции окончательной штамповки свидетельствуют о том, что технология с использованием разгонки металла при операции предварительной штамповки, обеспечивает получение более точных поковок в сравнении с действующей технологией. Максимальное отклонение диаметра поковки  $D$  для опытной партии составило  $\Delta D = 2$  мм, для сравнительной партии  $\Delta D = 4$  мм. Отклонение по толщине обода поковки  $h$  для опытной партии составило  $\Delta h = 1$  мм, для сравнительной партии  $\Delta h = 2$  мм.

Стоит отметить, что величина площади контакта поковки с формовочным кольцом  $l$  (рисунок 3.5), характеризует равномерность распределения металла по периметру поковки, а именно в ободке. Таким образом, если площадь контакта  $l = 0$ , то в данном месте отсутствует контакт металла с формовочным кольцом, что было характерно для поковок, произведенных в сравнительной партии, по действующей технологии. Наибольшее отклонение величины площади контакта  $l$  для опытной партии составило  $\Delta l = 9$  мм, в то время как для сравнительной партии  $\Delta l = 29$  мм, что говорит о неравномерном заполнении штампов в области обода, как следствие, неравномерном формировании обода по периметру поковки.

Наибольшее влияние на равномерное распределение металла по периметру поковки при окончательной штамповке оказывает точное позиционирование заготовки на нижнем инструменте деформации в начальный момент операции. При действующей технологии (сравнительная партия) точное позиционирование обеспечивается только за счет работы центрователей прессы R-9000, в то время как для опытной партии, элемент поковки в виде полутора, сформированный при предварительной штамповке, обеспечивал дополнительное самоцентрирование заготовки, что в итоге способствовало более точному позиционированию, и как следствие, равномерному распределению металла по периметру поковки.

Во время производства сравнительной и опытной партии произведена регистрация и последующий анализ силовых параметров работы прессов R-5000 и R-9000 (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Силовые параметры работы прессов

Партия заготовок	Пресс	Усилие штамповки, МН	
		Промышленная апробация	Моделирование в Deform 3D
Сравнительная партия	R-5000	45,2	46,0
	R-9000	81,6	80,2
Опытная партия	R-5000	40,2	41,2
	R-9000	58,3	57,1

Анализ полученных результатов энергосиловых параметров показал, что наиболее энергоэффективной с точки зрения равномерности распределения усилий по прессам является калибровка опытной партии заготовок. Снижение усилия штамповки при использовании новой калибровки для прессы R-5000 составило 11,0 %, для прессы R-9000 – 28,5 %. При окончательной штамповке по действующей технологии, в первую очередь заполняется область ступицы поковки и окончание процесса штамповки характеризуется течением металла из области ступицы, в область обода, с резким увеличением усилия штамповки. Главным фактором, обеспечивающим снижение усилия штамповки, явилось рациональное распределение металла при операции предварительной штамповки, за счет реализации разгонки. При окончательной штамповке это обеспечило равномерное и одновременное заполнение областей ступицы и обода поковки к концу операции.

Стоит отметить высокую сходимость значений технологических параметров работы оборудования, полученных при промышленной апробации (сравнительная и опытная партии), и компьютерном моделировании, описанном в главе 2.

После завершения операций деформации на прессо-прокатной линии, черновое колесо манипулятором укладывается на поворотный стол лазерного измерителя, предназначенного для безконтактного измерения высоты и диаметра ступицы, толщины диска, внутреннего и внешнего диаметра, максимального диаметра колеса и ширины обода [2]. Три лазерные измерительные головки установлены таким образом, чтобы при повороте колеса на  $360^\circ$  осуществлять измерения его размеров, определять среднее, минимальное и максимальное его значение. Вся информация отображается на графическом мониторе на посту управления (рисунок 3.6). Сведения о размерах чернового колеса используются для оперативного управления технологическим процессом.

На основе данных, полученных от лазерного измерителя, произведен анализ «горячих» размеров черновых колес сравнительной и опытной партии (таблица 3.5).

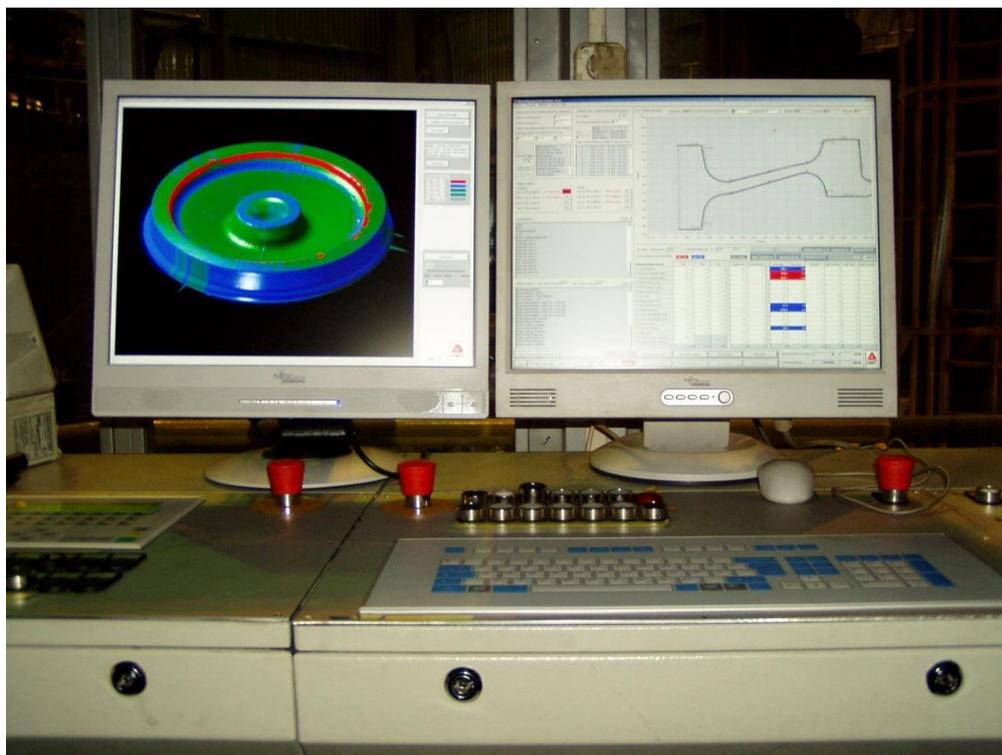


Рисунок 3.6 – Интерфейс программы управления лазерным измерителем

Таблица 3.5 – Геометрические параметры колес после прессо-прокатной линии

№	Измеряемые параметры	Горячие размеры (после прессо-прокатной линии)							
		Опытная партия				Сравнительная партия			
		мин, мм	макс, мм	сред. зн., мм	Δ, мм	мин, мм	макс, мм	сред. зн., мм	Δ, мм
1	Диаметр наружный по кругу катания	979,0	982,2	980,5	3,2	976,1	981,2	978,2	5,1
2	Диаметр внутренний с наружной стороны	806,8	811,1	808,2	4,3	807,4	810,0	808,2	2,6
3	Диаметр внутренний с внутренней стороны	815,1	817,6	815,8	2,5	814,5	818,4	816,5	3,9
4	Толщина диска у ступицы	33,8	36,1	35,1	2,3	34,2	36,4	35,3	2,2
5	Толщина диска у обода	25,1	25,7	25,4	0,6	24,8	26,2	25,6	1,4
6	Ширина обода	139,4	140,6	140,0	1,2	139,4	140,9	140,1	1,5
7	Выступание	84,9	85,6	85,4	0,7	85,2	86,5	85,7	1,3
8	Эксцентриситет с наружной стороны	0,4	3,0	1,4	2,6	0,0	2,5	1,4	2,5
9	Эксцентриситет с внутренней стороны	0,4	2,2	1,1	1,8	0,1	1,8	0,9	1,7

Средние значения геометрических параметров опытной партии соответствуют значениям сравнительной партии. Отклонений по максимальным и минимальным значениям не зафиксировано. Стоит отметить, что для опытной

партии, среднее значение наружного диаметра по кругу катания составляет 980,5 мм, что на 2,3 мм больше относительно сравнительной партии, что обеспечивается благодаря более точному выполнению элементов черного колеса (разница между минимальными и максимальными значениями) при использовании опытной калибровки. Большая величина наружного диаметра обеспечивает дополнительную возможность для удаления дефектов на поверхности катания колеса во время механической обработки, исключая перевод колес в брак по минимальному размеру и выпуску колес заниженного диаметра. На формирование области обода основное влияние оказывает операция окончательной штамповки. Если на данном этапе происходит неравномерное заполнение штампов в области обода, то все отклонения будут унаследованы в готовом колесе, поскольку операция прокатки на колесопрокатном стане не обеспечивает течение металла из зоны диска в обод, осуществляется только раскатка диска по диаметру, формирование толщины и профиля поверхности катания обода. Таким образом, наружный диаметр колеса формируется за счет равномерного распределения металла в области обода при операции окончательной штамповки, что характерно для колес опытной партии.

Для обеспечения требуемых механических свойств и твердости готовой продукции, осуществлена термическая обработка двух партий, включающая в себя закалку колес с последующим отпуском. После термообработки также производился контроль геометрических параметров (табл. 3.6).

При анализе результатов размеров колес, полученных от лазерной установки прессо-прокатной линии и замеренных после термообработки, основные различия связаны с уменьшением размеров колес после остывания, которое объясняется влиянием показателя линейного расширения металла для «горячих» колес. Данный показатель составляет 1,014 и используется при проектировании инструмента деформации. Так же стоит отметить изменение величины выступания торца ступицы относительно обода с внутренней стороны колеса (выступание), которое дополнительно увеличивается во время операции термообработки, что связано с влиянием термических напряжений.

Таблица 3.6 – Геометрические параметры колес после термообработки

№	Измеряемые параметры	Холодные размеры (после термообработки)							
		Опытная партия				Сравнительная партия			
		мин, мм	макс, мм	сред. зн., мм	Δ, мм	мин, мм	макс, мм	сред. зн., мм	Δ, мм
1	Диаметр наружный по кругу катания	964,8	967,0	966,0	2,3	961,3	965,8	963,3	4,5
2	Диаметр внутренний с наружной стороны	793,5	797,3	795,5	3,8	793,0	795,8	794,2	2,8
3	Диаметр внутренний с внутренней стороны	803,0	805,0	804,0	2,0	802,5	805,8	804,2	3,3
4	Толщина диска у ступицы	32,6	33,3	33,0	0,6	32,8	34,1	33,2	1,4
5	Толщина диска у обода	24,9	26,0	25,4	1,1	25,3	26,0	25,8	0,8
6	Ширина обода	137,6	138,8	138,4	1,1	138,2	139,5	138,6	1,3
7	Выступание	86,9	88,6	88,0	1,6	88,4	89,0	88,9	0,6
8	Эксцентриситет с наружной стороны	2,0	4,0	2,7	2,0	2,0	4,0	3,0	2,0
9	Эксцентриситет с внутренней стороны	1,0	3,0	1,7	2,0	1,0	3,0	1,9	2,0

После термообработки черновые колеса направлялись на участок механической обработки, где осуществляется обточка всего профиля колеса, так называемая полнопрофильная обработка. После обработки на станках все колеса проходили линию выходного контроля, где производится оценка качества и фиксирование наличия дефектов в готовых колесах. Результаты контроля геометрических параметров колес представлены в таблице 3.7.

Анализируя данные размеров чистовых колес, можно сделать вывод, что средние значения измеряемых параметров для опытной партии сопоставимы с результатами, полученными на сравнительной партии. Все чистовые колеса, произведенные по опытной калибровке, признаны годными с первого предъявления и отгружены потребителю.

При первом предъявлении колес из сравнительной партии, два колеса №327402 и №327425 были отправлены на дополнительный ремонт для удаления дефекта «чернота обода», который представляет собой не обработанную поверхность и образуется по причине нехватки металла во время обточки, при работе станка по заданной программе. Ремонт колес осуществляется на отдельном станке, который работает в ручном режиме и обеспечивает локальное (по отдельному элементу) удаление подобных дефектов при условии обеспечения

достаточного запаса металла на элемент профиля. После проведения ремонта, при повторном предъявлении оба колеса были признанными годными, все колеса сравнительной партии отправлены потребителю.

Таблица 3.7 – Геометрические параметры чистовых колес

Измеряемые параметры	Опытная партия				Сравнительная партия			
	мин, мм	макс, мм	сред. зн., мм	Δ, мм	мин, мм	макс, мм	сред. зн., мм	Δ, мм
Диаметр наружный по кругу катания	954	958	956,1	4	951	955	953,1	4
Диаметр внутренний с внутренней стороны	805	806	805,8	1	805	807	805,7	2
Диаметр внутренний с наружной стороны	802	803	802,8	1	802	803	802,6	1
Ширина обода	131	133	132,4	2	131	133	132,4	2
Диаметр отверстия ступицы с наружной стороны	173	175	173,8	2	173	174	173,8	1
Диаметр отверстия ступицы с внутренней стороны	172	175	172,3	3	172	173	172,1	1
Выступ ступицы с внутренней стороны	84	86	85,3	2	84	87	85,6	3
Длина ступицы	193	196	193,9	3	193	195	193,9	2
Толщина диска у обода	19	22	20,6	3	19	22	20,1	3
Толщина диска у ступицы	26	27	26,2	1	25	28	26,1	3

Таким образом, можно сделать вывод, что технология предварительной штамповки с обеспечением разгонки, прошедшая апробацию на прессо-прокатной линии, обеспечивает производство цельнокатаных железнодорожных колес в соответствии с требованиями нормативной документации и с высокими качественными показателями.

### 3.3. Выводы по разделу

1. Анализ результатов отклонений геометрических параметров поковок после операции окончательной штамповки, свидетельствует о том, что технология, с использованием разгонки металла обеспечивает получение более точных размеров поковки в сравнении с действующей технологией.

2. Для черновых колес, произведенных в опытной партии, характерна большая величина наружного диаметра, что обеспечивает дополнительную возможность для удаления дефектов на поверхности катания колеса во время механической обработки, исключая перевод колес в брак по минимальному размеру и выпуску колес заниженного диаметра.

3. Анализ энергосиловых параметров показал, что наиболее энергоэффективной с точки зрения равномерности распределения усилий по прессам является калибровка опытной партии заготовок. Снижение усилия штамповки при использовании новой калибровки для прессы R-5000 составило 11,0 %, для прессы R-9000 – 28,5 %.

4. Технология предварительной штамповки с обеспечением разгонки при операции предварительной штамповки, прошедшая апробацию на прессо-прокатной линии, обеспечивает производство цельнокатаных железнодорожных колес в соответствии с требованиями нормативной документации и с высокими качественными показателями.

#### **4. ВНЕДРЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ КОЛЕСОБАНДАЖНОГО ЦЕХА**

Одной из важных составных частей управления качеством продукции в процессе производства железнодорожных колес является контроль качества изготавливаемой продукции и технологических процессов ее производства. В случае применения в производстве высокопроизводительного технологического оборудования одним из важных требований, предъявляемых к изготавливаемой продукции, является требование однородности, характеризуемое определенным допуском. Для обеспечения этой однородности нужно систематически осуществлять контроль за качеством продукции, не допуская неожиданных изменений параметров настройки оборудования, которые могут привести к массовому браку.

В настоящее время многие промышленные компании в условиях сложившейся конкуренции обязаны находить альтернативные методы снижения издержек, в том числе и за счет сокращения выпуска несоответствующей продукции на предприятии. Наличие брака предполагает последующее выявление, исправление и утилизацию дефектных единиц, что требует дополнительных материальных и временных издержек.

Для создания эффективного бездефектного производства на предприятиях активно вводят систему менеджмента качества, базирующуюся на периодическом контроле технологических процессов производства и выпускаемой продукции. Такой систематический контроль можно выполнить при помощи статистических методов, которые позволяют не только осуществлять контроль за качеством продукции, но и по нему судить о качестве технологического процесса и производить регулирование последнего.

Сутью статистических методов контроля является то, что заключение о качестве продукции и стабильности технологического процесса производят по результатам выборочного контроля параметров производимой продукции. Для выявления отклонений технологического процесса, требуется осуществлять

измерение параметров, и в зависимости от результатов измерений либо продолжать процесс, если отклонений не выявлено, либо, если выявлены отклонения, внести соответствующие корректировки в технологический процесс.

Данные измерений вносят в контрольную карту и по расположению данных в контрольной карте делают вывод о качестве технологического процесса, а конкретно - выход контролируемой статистической характеристики за границу регулирования является сигналом о разладке данного технологического процесса.

#### **4.1. Основные понятия и принципы статистического контроля процессов производства**

Статистический контроль процессов производства является способом мониторинга производственного процесса с внедрением статистических инструментов, целью которого, является управление качеством продукции «непосредственно в процессе производства» [125].

Традиционное представление производства, вне зависимости от вида продукции, охватывает изготовление и контроль качества продукции, в том числе проверку готовой продукции на соответствие установленным требованиям и отбраковку несоответствующих единиц продукции. Такая стратегия часто приводит к излишним затратам и оказывается неэкономичной, поскольку построена на проверке готовой продукции, когда несоответствующие единицы продукции уже изготовлены. Более эффективна стратегия предупреждения потерь, позволяющая, прежде всего, избежать производства несоответствующей продукции. Такая стратегия предполагает сбор информации о процессе, ее анализ и проведение своевременных мероприятий по улучшению собственно процесса [126].

Статистическое управление процессами (SPC) широко распространено в промышленности в настоящее время. Основной идеей данного метода является использование контрольных карт Шухарта, которые представляют собой графическое отображение собранных данных и последующее принятие решений

относительно стабильности либо непредсказуемости рассматриваемого процесса, что определяет способы управления соответствующим процессом.

Понятие SPC было в первый раз введено Уолтером Шухартом, американским учёным в области теории управления качеством. Он разработал приемы составления диаграмм управления, которые использовались для оперативного определения производственных периодов, в которые производилась дефектная продукция. Саму концепцию статистической управляемости и контрольные карты Шухарт разработал в 1924 г.

Эдвардс Деминг настойчиво пропагандировал статистические наработки Шухарта и сыграл большую роль в американской индустрии, как организатор курсов по внедрению контроля качества. В 1950 г. Деминг посетил Японию и встречался с Союзом японских ученых и инженеров с целью ввести методы SPC в японскую промышленность. Деминг воспользовался приемами Шухарта и внедрил их в послевоенной Японии, что вывело ее на позиции страны, оспаривающей лидерство США в производстве автомобилей и аудио-видео техники.

Статистическое управление процессом представляет собой методологию установления и поддержания процесса на приемлемом и стабильном уровне, обеспечивающем соответствие продукции установленным требованиям. Главным статистическим инструментом управления процессом является контрольная карта, т.е. графический способ представления и сопоставления информации, основанной на анализе данных последовательных выборок, отражающих текущее состояние процесса, с границами, установленными на основе присущей процессу внутренней изменчивости. Метод контрольных карт, прежде всего, помогает оценить, достиг ли процесс управляемого состояния или продолжает ли он находиться в этом состоянии. Если процесс управляем, то считается, что он стабилен и предсказуем, и тогда далее следует анализировать способность процесса удовлетворять требованиям потребителя. Контрольные карты также могут использоваться для непрерывной регистрации характеристик качества по мере работы процесса. Кроме того, контрольные карты помогают выявлять необычные структуры

вариации данных, возникающие в повторяющихся процессах, и обеспечивают критерии выявления потери статистической управляемости. Использование контрольных карт и их тщательный анализ ведут к улучшению понимания процессов и часто способствуют обнаружению путей для ценных улучшений

Использование метода мониторинга производственного процесса осуществляется с целью управления качеством продукции непосредственно в технологическом процессе производства, вместо проведения контрольных проверок для обнаружения уже случившихся проблем, связанных с разладкой оборудования и выпуска некачественной продукции [127].

Основным назначением системы контроля качества производства является определение, находится ли технологический процесс в рамках технических требований, поскольку в любом процессе присутствует собственная изменчивость, необходимо определить, даст ли процесс ожидаемые результаты.

Так же данный метод помогает определить, работает ли данный процесс в рамках статистически управляемого состояния. Если процесс находится в «статистически управляемом» состоянии, то нам известно, как он будет себя вести в будущем, и можем ли мы рассчитывать на адекватность и надежность его результатов. Своевременное отслеживание результатов и других случаев отклонения в поведении технологического процесса служит для осуществления корректирующих действий до того, как произойдет изменение параметров настройки оборудования и начнется выпуск несоответствующей продукции.

Основной целью метода статистического контроля процесса производства является получение статистически управляемого состояния технологического процесса, которое осуществляется за счет выявления особых причин изменчивости и последующего их устранения. Кроме того, данный метод позволяет поддерживать статистически управляемое состояние технологического процесса, в рамках которого ведется мониторинг показателей стабильного технологического процесса и улучшать возможности процесса [128, 129].

В массовом производстве качество готового продукта определяется контролем качества. Каждая единица продукции может быть оценена как годное

изделие, либо может быть забракована, исходя из того, насколько она соответствует требованиям, предъявляемым к данному виду продукции. Таким образом, использование статистического метода контроля процесса производства при наблюдении за ходом производственного процесса с целью заблаговременного определения отклонений, которые могут привести к производству бракованного продукта приводит к снижению производственных затрат на последующее выявление и устранение дефектов производства [130].

В процессе производства невозможно получить всю продукцию идентичного качества. Изменение параметров продукции, колеблющееся в определенных пределах, называется распределением параметров и отражает закономерности определенного технологического процесса. Распределение параметров определяется комплексом случайных и систематических причин, которые действуют в процессе производства и определяют погрешности технологического процесса. Как показывает практика, большинство технологических параметров распределяются по закону нормального распределения.

Как известно, основными статистическими характеристиками нормального распределения являются среднее значение ( $\bar{X}$ ) и стандартное (среднеквадратическое) отклонение ( $\sigma$ ). Беря выборку из статистической совокупности и вычисляя ее статистические характеристики  $\bar{X}$  и  $\sigma$ , считают, что они являются оценками характеристик всей совокупности, т.е.  $\bar{X} \approx \bar{X}_0$  и  $\sigma \approx \sigma_0$ .

График плотности нормального закона распределения отражает изменение частоты попадания измеряемой величины в соответствующий интервал значений. Для того, чтобы сделать заключение о наличии брака в контролируемой партии изделий, нужно сопоставить практическую зону рассеяния измеряемого параметра  $\bar{X} = \pm 3 \sigma$  (в нее попадает 99,73% контролируемых предметов) с полем допуска на этот параметр  $\Delta$  (рисунок 4.1).

Годными являются все изделия, у которых контролируемый параметр  $X$  отклоняется от его номинального значения  $X_{ном}$  не более чем на величину

допуска  $\Delta/2$ . Наличие брака обуславливается не только соотношением ширины поля допуска и диапазона рассеяния, но и величиной смещения среднего значения распределения  $\bar{X}$  относительно  $X_{\text{ном}}$ .

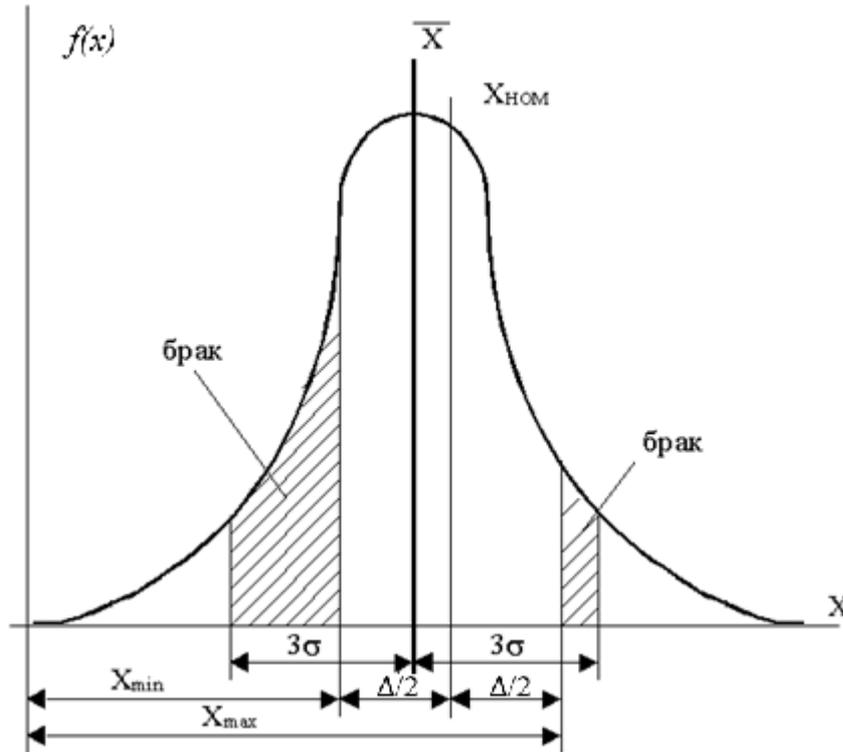


Рисунок 4.1 – График плотности нормального закона распределения

Брак может появиться в следующих случаях, во-первых, практическая зона рассеяния больше поля допуска на исследуемый параметр. Это означает, что точность процесса низкая и не обеспечивает заданной точности параметра. Во-вторых, практическая зона рассеяния меньше поля допуска, но имеется значительное смещение середины зоны рассеяния относительно середины поля допуска. Это указывает на смещение центра настройки оборудования, либо имеются обе причины.

При построении контрольных карт необходимо определить следующие параметры: контрольные границы для статистических характеристик измеряемой величины, характеризующие границы регулирования технологического процесса, периодичность отбора выборок или проб, меры, которые необходимо принять при

предупреждающем сигнале и сигнале о разладке технологического процесса [127,131].

Методы статистического регулирования технологических процессов с применением различных контрольных карт стандартизованы в государственных стандартах РФ, международных стандартах и национальных стандартах многих стран.

#### **4.2. Внедрение системы статистического контроля процессов производства в условиях колесобандажного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК»**

Железнодорожные колеса являются основным элементом ходовой части вагонов и наиболее ответственными деталями подвижного состава, поэтому к железнодорожным колесам в части качества их поверхности, основных размеров и показателей механических свойств и твердости предъявляются особо высокие требования [132].

Повышенные требования к железнодорожным колесам обуславливают весьма жесткую их приемку, при которой часть колес отбраковывается. Это увеличивает расходный коэффициент, а следовательно, приводит к снижению экономических показателей производства.

Эффективная борьба с браком цельнокатаных колес, помимо улучшения экономических показателей производства, способствует также повышению срока службы колес, обеспечению безопасности движения и нормальной работы железнодорожного транспорта.

Наличие отклонений геометрических параметров по отдельным элементам колес приводит к ухудшению условий эксплуатации, за счет дисбаланса колес и появления дополнительных динамических воздействий на рельс и на колесо. С повышением скорости движения подвижного состава наличие дисбаланса сказывается все в большей степени, что приводит к стремлению потребителей еще больше ограничить допуски на размеры цельнокатаных колес.

Естественно, что жесткие требования по геометрии цельнокатаных колес увеличивают процент продукции, не удовлетворяющей этим требованиям, то есть появление брака или продукции второго сорта.

Высокие требования предъявляются и к состоянию поверхности колес. Значительное количество поверхностных дефектов возникает и в процессе деформирования колесной заготовки на прессах и колесопрокатном стане. Если эти дефекты не могут быть удалены механической обработкой, за счет допуска, то такие колеса также бракуются.

Наконец, часть колес может не удовлетворять требованиям по механическим свойствам и по технологическим испытаниям. Эти испытания обеспечивают безопасность движения и поэтому необходимо безоговорочное выполнение требований, предъявляемых эксплуатацией. Даже минимальное отклонение от этих требований ведет к отбраковке продукции.

При наличии столь жестких требований и ограничений, любое отклонение от технологии деформирования и термической обработки колес, а также от технологии механической обработки может породить в производстве брак или, в некоторых случаях, отклонения от заданных размеров, которые заставляют классифицировать продукцию как неполноценную (второй сорт).

Необходимо отметить, что отклонения по размерам колес могут быть обусловлены нарушением технологии прокатки колес или механической обработки заготовки. В свою очередь, поверхностные дефекты могут появляться в результате неправильного нагрева и деформирования, а также при нарушениях правил транспортировки колес. Наконец, дефекты по механическим свойствам, твердости и структуре металла являются следствием нарушения технологии термической обработки колес. Чистота металла и наличие недопустимых дефектов стали обусловлено технологией выплавки и разлива стали.

Таким образом, нарушение технологии прокатного производства может привести к образованию поверхностных дефектов и дефектов, связанных с отклонением от заданных геометрических параметров.

С целью снижения уровня несоответствующей продукции при производстве железнодорожных колес, в 2015 году в колесобандажном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК» началась работа по внедрению статистического контроля процессов производства. Поскольку система статистического управления процессом (SPC) является только инструментом, был разработан и реализован ряд мероприятий для адаптации данной системы к процессам производства железнодорожных колес [133].

В первую очередь, для реализации проекта по внедрению системы статистического контроля, определено наиболее «узкое» место технологического потока производства, в котором зафиксировано наибольшее количество причин выпуска несоответствующей продукции.

Для этой цели проведен анализ по видам брака железнодорожных колес и производственным участкам, на которых он получен.

Проведенный анализ несоответствующей продукции за период с 2012 по 2015 показал, что основной составляющей структуры брака является блок чернота, который составил 32,8 % от общего всего объема забракованной продукции и блок дефекты по геометрии, составляющий 27,3 % (рисунок 4.2). Основной причиной получения данных дефектов являются отклонения и нарушения режимов горячего деформирования.

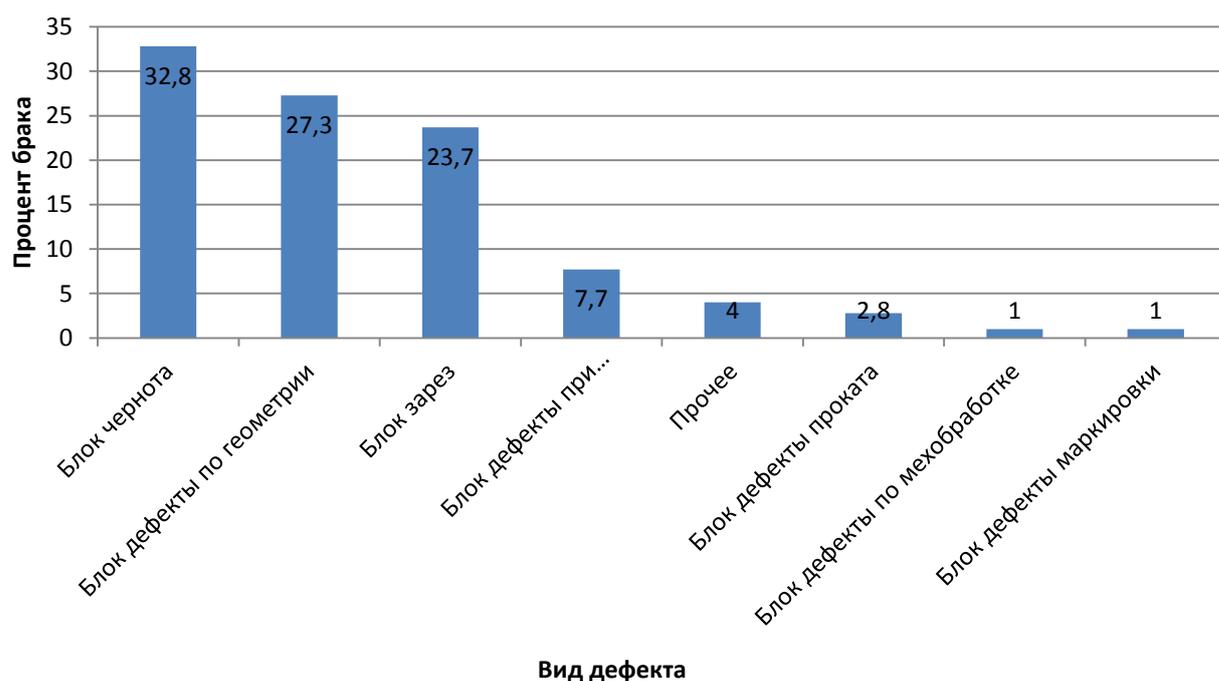


Рисунок 4.2 – Анализ брака по видам дефектов (по данным за 2012-2015 г.)

Поскольку основная часть несоответствующей продукции колесобандажного цеха была связана с отклонениями и нарушениями в технологии производства на прессо-прокатной линии, то «пилотный» проект по реализации системы статистического контроля процессов производства был осуществлен на главном посту управления прессо-прокатной линии.

В первую очередь в рамках реализации данного проекта выполнен выбор параметров, которые требовалось контролировать и стабильность которых способствует выпуску качественной продукции. Поскольку брак, связанный с чернотой и дефектами по геометрии, в первую очередь является последствием отклонения или не выполнения требуемых геометрических параметров черного колеса после деформации на прессо-прокатной линии, то в качестве контролируемых параметров были выбраны 16 основных геометрических параметров производимого профиля (рисунок 4.3).

При разработке системы ставилась задача осуществлять контроль за выбранными параметрами в режиме реального времени с частотой обновления данных для каждого произведенного колеса. Для наглядной визуализации, окно мониторинга системы статистического контроля отображает граничные условия и показывает выборку из значений контролируемого параметра для 15 последних произведенных колес.

Основная цель при реализации системы статистического контроля - это определение отклонений в технологии производства колес в режиме реального времени. Таким образом, стало возможно оперативно вносить корректировки на технологическом оборудовании при выявлении случаев отклонения одного из контролируемых параметров от установленного диапазона.

Разработанная система сигнализирует о попадании контролируемых параметров за пределы граничных условий, вследствие чего, внедрены всплывающие окна с сообщениями о мероприятиях, требующихся для устранения причин отклонений.

Дополнительно, данная система модернизирована внедрением системы реагирования. Данное дополнение сигнализирует оператору о стремлении

параметра к критическому значению, при условии, что соблюдается убывающая или возрастающая последовательность из пяти и более точек для каждого из контролируемых параметров, чтобы заранее предпринять меры для исключения выхода параметров за граничные условия и предотвратить выпуск несоответствующей продукции.

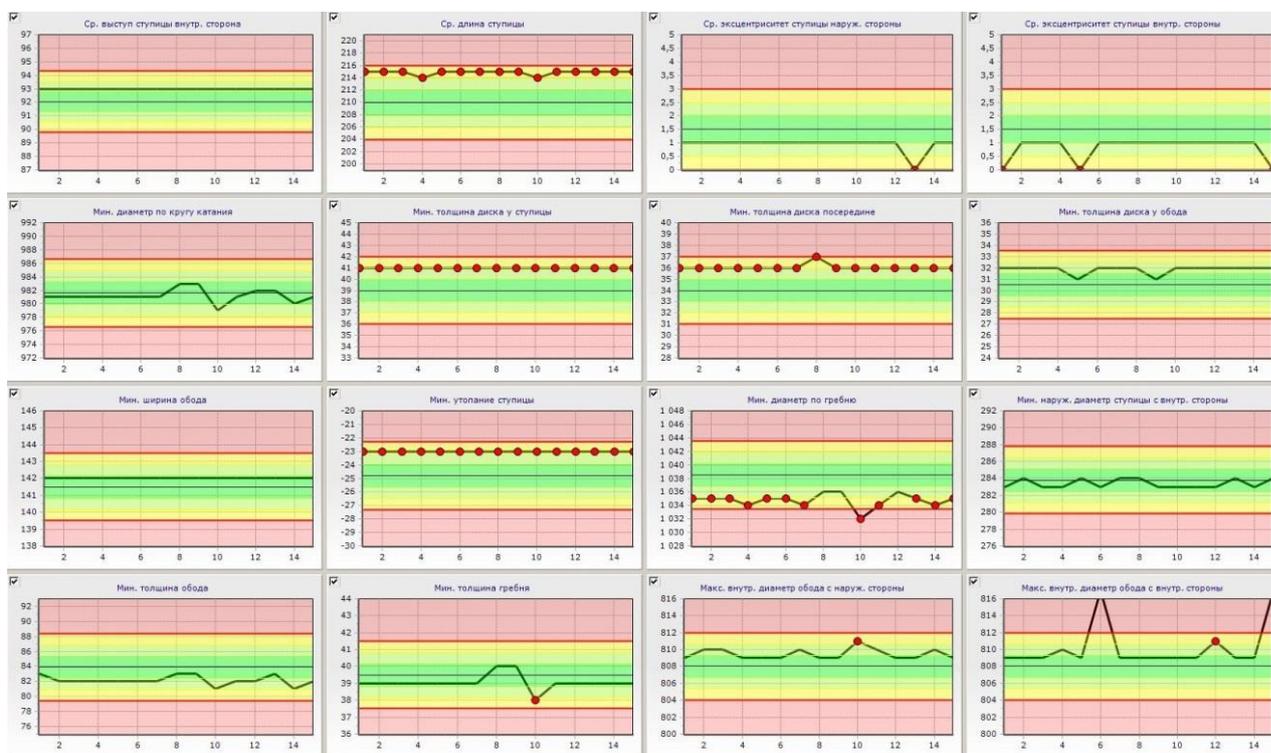


Рисунок 4.3 – Окно системы контроля геометрических параметров

Основным преимуществом разработанной системы является ее способность реагировать на изменения еще до выхода параметра за критические значения.

Впервые реализована работа подобной системы статистического контроля с функцией «советчика оператора». При необходимости корректировки процесса, система сигнализирует всплывающим окном на мониторе о проблемном параметре и требуемыми рекомендациями по корректировке.

Проделана огромная работа по определению оптимальных корректировок оборудования при возникновении того или иного отклонения, а зачастую их совокупность, поскольку корректировка одного размера, влечет за собой изменение других размеров профиля колеса.

Для всех контролируемых параметров разработан своего рода план последовательных действий, который необходимо выполнить для стабилизации параметра. «Советчик» реагирует как на выход параметра за граничные пределы, так и при установившейся тенденции в одном направлении.

Так, если параметр внутреннего диаметра обода колеса с внутренней стороны выходит за граничное значение, то оператору визуализируется информационное оповещение об отклонении параметра, с указанием причины и величины отклонения (рисунок 4.4).

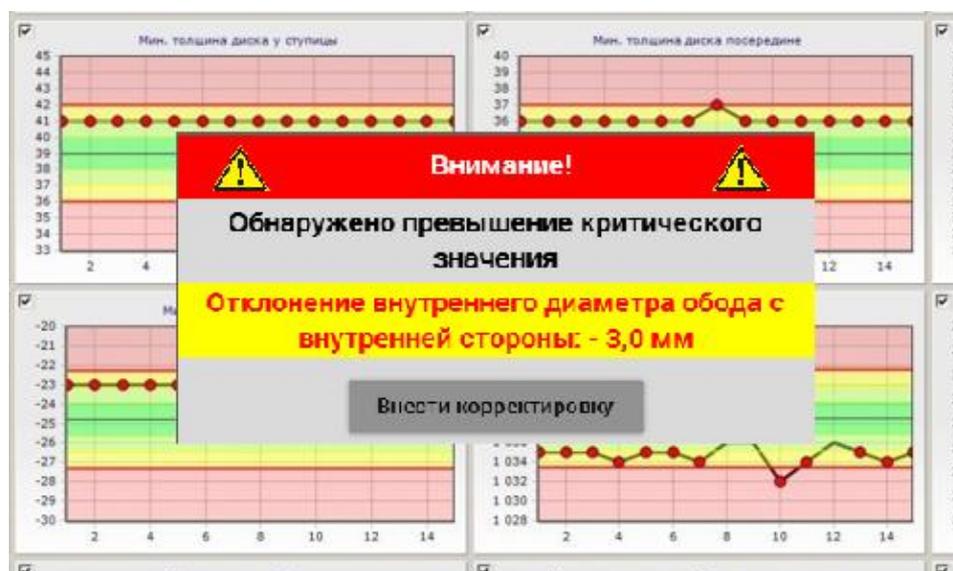


Рисунок 4.4 – Пример информационного сообщения при отклонении технологического процесса

Далее оператору требуется отреагировать на сообщение и подтвердить внесения корректировки нажатием соответствующей кнопки.

После этого, для оператора открывается окно ввода соответствующей корректировки в окне управления соответствующим агрегатом, с указанием требуемой величины корректировки. Отклонение значений внутреннего диаметра обода в первую очередь связаны с работой колесопрокатного стана, таким образом открывается вкладка программы управления станом DRAW-1400 с указанием требуемой величины корректировки (рисунок 4.5).

В зависимости от производственной ситуации и параметра, который выходит за граничные значения, система может предложить несколько вариантов

корректирующих действий, как на одном, так и на нескольких агрегатах прессы-прокатной линии. Помимо этого, система выдает рекомендации о проверке влияния косвенных параметров технологического процесса на возникновение отклонения, такие как концентрация технологической смазки на прессах (рисунок 4.6), нагрузка силовых насосов и т.п.

Система находится в режиме постоянного совершенствования путем корректировок рекомендуемых воздействий по мере накопления опыта.

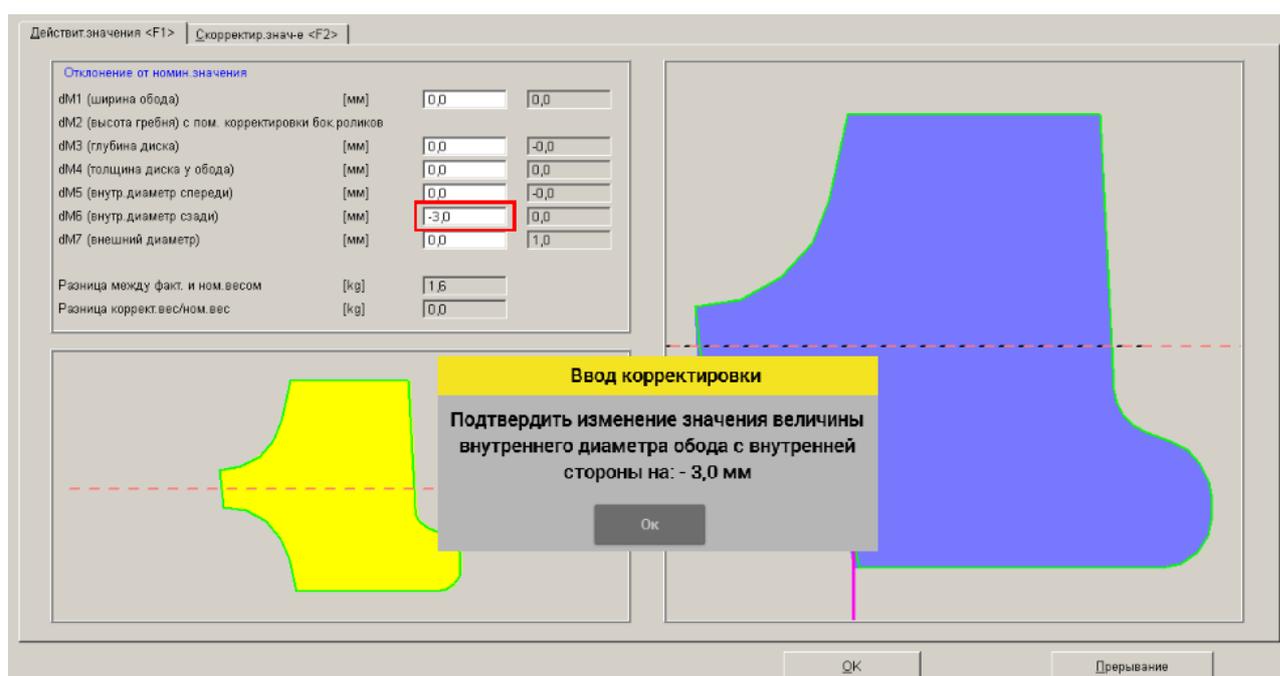


Рисунок 4.5 – Ввод корректировки в программе управления колесопркатным станом

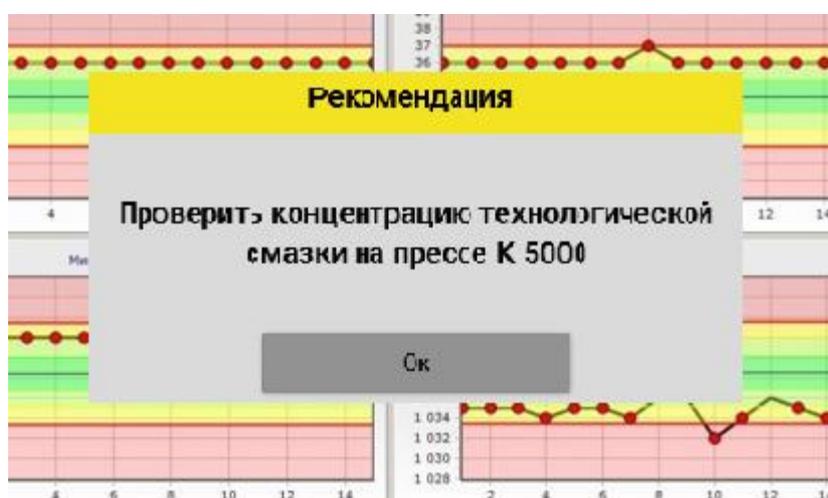


Рисунок 4.6 - Пример информационного сообщения с рекомендацией

Поскольку в последнее время внедрение цифровых продуктов с целью повышения производительности и качества выпускаемой продукции обрело массовый характер, происходит модернизация функции «советчика оператора» на основе работы нейронной сети. Данное цифровое решение основано на машинном обучении, так система будет создавать базу данных и самообучаться на основе каждого принятого решения оператора по корректировке технологического процесса. В перспективе, система сможет автоматически анализировать и вносить изменения в производственный процесс на основе собранной базы данных.

Так же в рамках реализации системы статистического контроля процессов производства дополнительно разработано программное обеспечение, позволяющее анализировать статистические базы данных, посредством контрольных карт Шухарта (рисунок 4.7).

Данная система разработана в дополнении к вышеописанной системе статистического контроля, и более глобально оценивает стабильность и воспроизводимость многих параметров, задействованных при производстве колес.

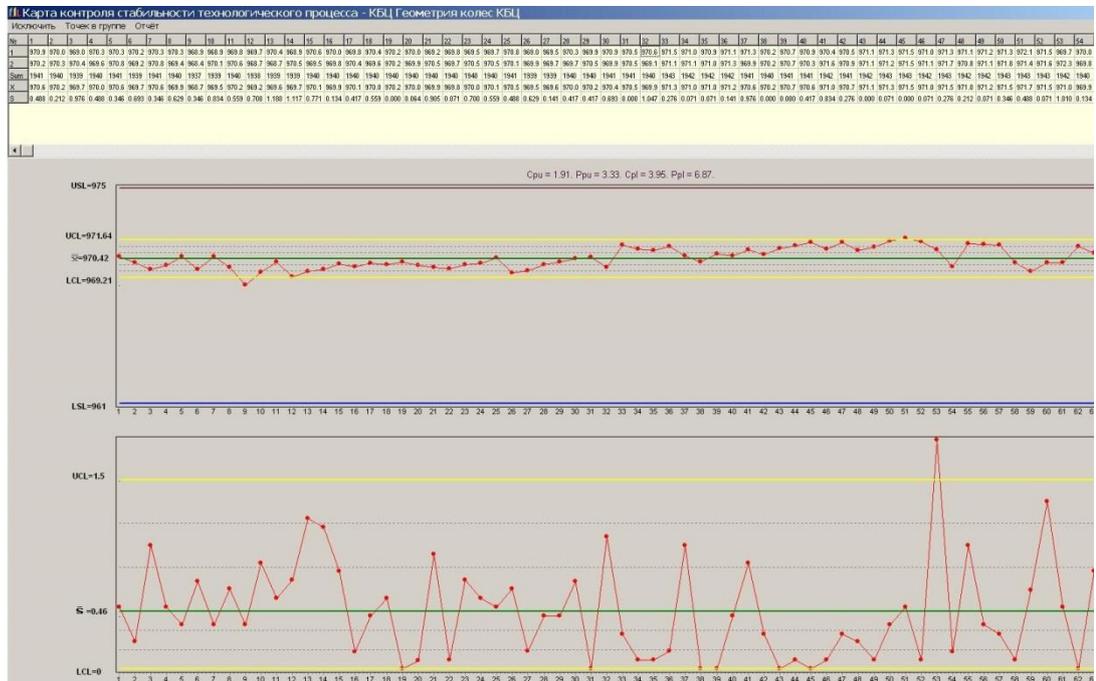


Рисунок 4.7 – Карта контроля стабильности технологического процесса

Данная система осуществляет сбор информации в базы данных для всех основных контролируемых параметров геометрии чернового колеса и для



Так, данная система позволяет еще на ранней стадии определить нестабильность в работе оборудования, что позволяет заблаговременно произвести профилактику или спланировать ремонт, предотвращая аварийные остановки оборудования. Особенностью данной системы является автоматический анализ полученных результатов. На основе собранной информации, разработанный алгоритм делает вывод о стабильности или нестабильности процесса. Система в автоматическом режиме два раза в смену формирует отчет (рисунок 4.8) о пригодности процесса на основе полученных данных и при обнаружении нестабильности информирует по средствам почты руководство участка.

Метод оценки стабильности технологического процесса предусматривает:

- а) сбор и анализ данных параметров технологии и оборудования;
- б) формирование контрольных карт;
- в) интерпретация контрольных карт и проверка структур на особые причины;
- г) определение воспроизводимости процесса.

Система карт Шухарта опирается на следующее:

1. Если изменчивость процесса ( $S$  - карты) и среднее процесса ( $X$ - карты) остаются постоянными на своих уровнях, то наносимые на карту статистики  $X$  (на  $X$  - карте),  $S$  (на  $S$  - карте) изменяются случайным образом и редко выходят за контрольные границы.

2.  $X$  - карта показывает, где находится среднее процесса и какова его стабильность, выявляет нежелательные вариации между подгруппами и вариации относительно их среднего.

3.  $S$  - карта выявляет изменчивость (вариабельность) внутри подгрупп и служит индикатором изменения вариабельности процесса.

Оценку возможностей процесса начинают после того, как на основе контрольных карт ( $X$ ,  $S$  - карты) проведен анализ стабильности процесса (выявлены, проанализированы, устранены или сокращены причины, определяющие изменчивость процесса). При демонстрации стабильного состояния

технологического процесса оцениваются индексы воспроизводимости процесса.

Количественную оценку возможностей стабильного процесса проводят на основе индекса воспроизводимости  $C_p$ .

$$C_p = \frac{U-L}{6 \cdot \sigma}, \quad (4.1)$$

где  $U$  - верхняя граница поля допуска;

$L$  - нижняя граница поля допуска;

$\sigma$  - оцененное внутригрупповое стандартное отклонение процесса, которое оценивают по средней изменчивости внутри подгрупп и выражают как  $s/0,94$ ;

$s$  - среднее выборочных стандартных (средних квадратических) отклонений подгрупп.

Значение  $C_p < 1$  указывает на то, что процесс является невоспроизводимым, а  $C_p = 1$  указывает на то, что процесс находится на границе воспроизводимости. На практике в качестве минимально полностью приемлемого значения принимают  $C_p = 1,33$ , поскольку всегда есть некоторые вариации в выборках, и не существует процессов, которые всегда находятся в статистически управляемом состоянии.

С начала 2016 года система статистического контроля процессов производства перешла в режим промышленной эксплуатации, обеспечила ведение технологического процесса с меньшей вариативностью, что привело к повышению качества черновых колес, как следствие, к снижению затрат на исправление дефектов и на отбраковку продукции. На протяжении последних пяти лет, за счет введения системы статистического контроля адаптированной для технологического процесса производства железнодорожных колес, с учетом ее модернизации функциями «советчика оператора» и анализа баз данных, снижение уровня брака составило 70 %, относительно показателей брака до внедрения данной системы (рисунок 4.9).

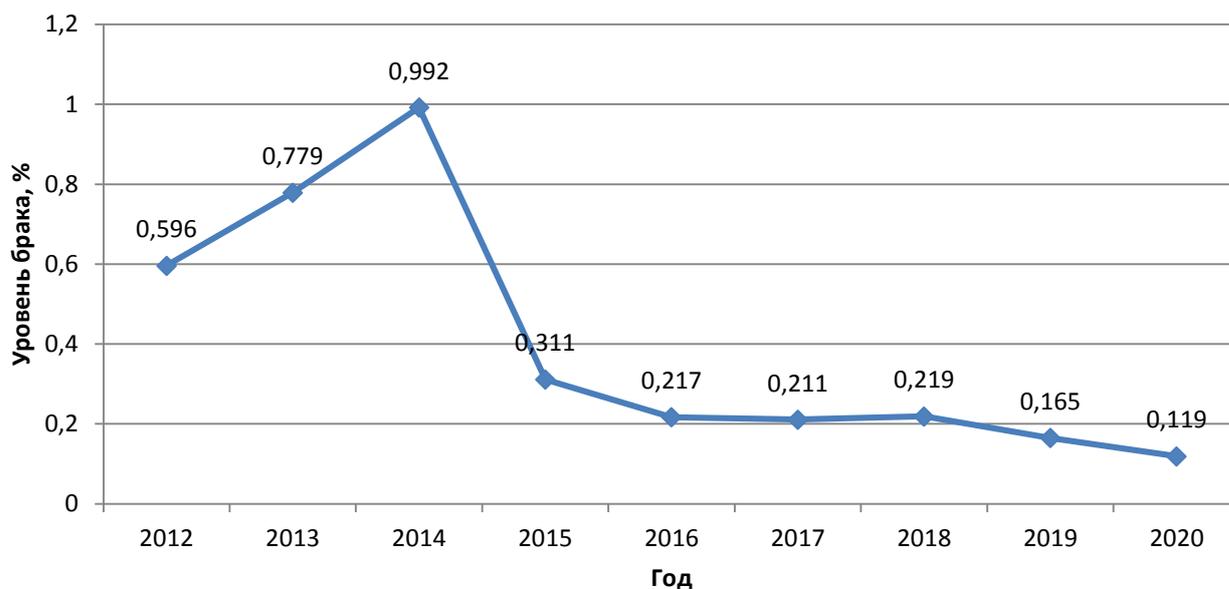


Рисунок 4.9 – Уровень брака (по данным за 2012-2020 г.)

### 4.3. Выводы по разделу

1. Внедрена и адаптирована система статистического контроля технологических процессов при производстве черновых колес в условиях колесобандажного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК».

2. Определены оптимальные значения корректировок технологических параметров процесса производства колес для каждого контролируемого параметра. Разработаны модели последовательных действий для случаев выхода контролируемого параметра (параметров) за граничные пределы, которые необходимо выполнить для стабилизации процесса.

2. Впервые реализована работа системы статистического контроля производства с функцией «советчика оператора». Функция способствует моментальному реагированию и сигнализации оператору о выявленном или предполагаемом отклонении в технологическом процессе и о необходимости внесения изменений с указанием рекомендаций по вводу корректировки.

3. Внедрен современный подход к построению системы управления качеством продукции, направленный на сбор данных о параметрах производимой продукции, их анализ, поиск источников изменений, их устранение и

последующее поддержание процесса в устойчивом состоянии с постоянным контролем технологических параметров.

4. Внедрение системы статистического контроля процессов производства позволило снизить уровень брака по причинам прокатного производства на 70%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты.

1. Проведен промышленный эксперимент со штыревой моделью. Определены закономерности течения металла, установлены начальные и граничные условия процессов предварительной и окончательной штамповки.

2. На основе компьютерного моделирования и промышленного эксперимента определены значения показателя сил трения для условий контактного взаимодействия заготовки с инструментом деформации в операциях предварительной и окончательной штамповки при наличии графитовой технологической смазки.

3. На основе уточненных начальных и граничных условий разработана компьютерная модель, используемая при анализе вновь разрабатываемых калибровок и совершенствовании существующих, обеспечивающая высокую сходимость (в пределах 5%) результатов компьютерного моделирования и промышленных данных.

4. Разработаны калибровки инструмента деформации для альтернативных способов предварительной штамповки, которые обеспечивают разгонку металла. Проведено компьютерное моделирование, на основе которого установлено, что при выполнении операции разгонки на этапе предварительной штамповки, при последующей окончательной штамповке, зафиксированы наилучшие показатели силовых параметров процесса, без ухудшения формирования элементов черного колеса.

5. Выполнен анализ влияния геометрических параметров поковки на положение нейтрального сечения, для технологической схемы, обеспечивающей разгонку металла при предварительной штамповке. Определен диапазон значений  $0,40 \leq S/h \leq 0,45$  ( $S$  – величина разгонки,  $h$  – высота штампованной поковки), обеспечивающий рациональное течение металла и снижение энергосиловых параметров при операции окончательной штамповки.

6. Выполнена промышленная апробация технологии предварительной штамповки с обеспечением разгонки металла при операции предварительной штамповки на прессо-прокатной линии колесобандажного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК». Анализ результатов отклонений геометрических размеров поковок после операции окончательной штамповки, свидетельствует о том, что технология, с использованием разгонки металла обеспечивает получение более точных размеров поковки в сравнении с действующей технологией и обеспечивает производство цельнокатаных железнодорожных колес в соответствии с требованиями нормативной документации. При промышленной апробации новой технологии отмечено снижение энергосиловых параметров работы оборудования: снижение усилия штамповки для прессы R-5000 составило 11,0 %, для прессы R-9000 – 28,5 %.

7. Внедрена и адаптирована система статистического контроля технологических процессов при производстве черновых колес в условиях колесобандажного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК», что позволило снизить уровень брака по причинам прокатного производства на 70%.

8. Определены оптимальные значения корректировок технологических параметров процесса производства колес для каждого контролируемого параметра. Разработаны модели последовательных действий для случаев выхода контролируемого параметра (параметров) за граничные пределы, которые необходимо выполнить для стабилизации процесса.

9. Впервые реализована работа системы статистического контроля производства с функцией «советчика оператора». Функция способствует моментальному реагированию и сигнализации оператору о выявленном или стремящемся к выходу отклонении в технологическом процессе и о необходимости внесения изменений с указанием рекомендаций по вводу корректировки.

**Перспективой дальнейшей проработки темы является:**

- разработка компьютерной модели операции прокатки черного колеса на колесопрокатном стане, с целью определения закономерностей течения металла и создания оптимальных режимов ведения технологического процесса;

- совершенствование функции «советчика оператора» системы статистического контроля производства на основе работы нейронной сети и машинном обучении, с целью автоматического анализа и внесения корректировок в технологический процесс производства.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (вместе с «Планом мероприятий по реализации в 2008–2015 годах Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года») : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 17.06.2008 № 877-р. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_92060/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_92060/) (дата обращения: 08.11.2021).
2. Кушнарев А. В. Разработка и теоретическое исследование новых способов изготовления железнодорожных колес на ОАО «НТМК» / А. В. Кушнарев ; Урал. гос. техн. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Нижнетагил. металлург. комбинат. – Нижний Тагил, 2009. – 46 с.
3. Производство железнодорожных колес / Г. А. Бибик, А. М. Иоффе, А. В. Праздников, М. И. Староселецкий. – Москва : Металлургия, 1982. – 232 с.
4. Шифрин М. Ю. Резервы производительности и выхода годного при прокатке колес / М. Ю. Шифрин. – Москва : Металлургия, 1989. – 144 с. – ISBN 5-229-00182-8.
5. Колеса для железнодорожного подвижного состава // Железные дороги мира. – 2009. – № 8. – С. 46–49.
6. Семечкин А. Е. Состояние рельсового и колесного производства в России и за рубежом / А. Е. Семечкин // Современные технологии производства транспортного металла : материалы 3-й Междунар. конф. «Трансмет – 2007» / под науч. ред. А. В. Кушнарера, А. А. Богатова. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. – С. 7–10.
7. Application of Cast Steel Wheel Technology for the Global Railway Industry / C. Lonsdale, M. Norton, K. Osuch, L. G. Wood // Proceedings of 16 International wheelset Congress, Cape Town, 14–18 March 2010. – Cape Town, 2010. – P. 38–41.
8. Оптимизация технологической схемы двухпроходной горячей штамповки железнодорожных колес / В. Н. Данченко, А. В. Шрамко, А. В. Ашкелянец, Х. Дыя // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов

давлением. – 2010. – № 4. – С. 27–30.

9. Паршин В. А. Исследование операции формовки при производстве железнодорожных колес // В. А. Паршин, О. А. Ганаго // Материалы к II конференции молодых научных работников г. Нижнего Тагила. Metallургическая секция. – Свердловск : Сред.-Урал. кн. изд-во, 1969. – С. 98–107.

10. Производство железнодорожных колес за рубежом / Г. А. Бибик, М. И. Староселецкий, М. С. Валетов, В. К. Серяченко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1977. – № 16. – С. 19–36.

11. Исследование причин образования зажимов при многопереходной штамповке полнопрофильных заготовок железнодорожных колес / А. В. Шрамко, Л. В. Голубева, В. Н. Данченко [и др.] // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 4. – С. 50–52.

12. Шифрин М. Ю. Производство цельнокатаных колес и бандажей / М. Ю. Шифрин, М. Я. Соломович. – Москва : Metallургиздат, 1954. – 500 с.

13. Кушнарeв А. В. Развитие и освоение на ОАО «НТМК» новой технологии производства железнодорожных колес высокого качества / А. В. Кушнарeв // Современные технологии производства транспортного металла : материалы 3-й Междунар. конф. «Трансмет – 2007» / под науч. ред. А. В. Кушнарeва, А. А. Богатова. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. – С. 22–30.

14. Совмещение операций осадки и разгонки на прессе усилием 49 МН с использованием заготовок из слитков, отлитых в цилиндрические изложницы с обточенной поверхностью / М. А. Волков, В. А. Тарасова, А. А. Яндимиров [и др.] // Современные технологии производства транспортного металла : материалы Междунар. конф. «Трансмет – 2007» / под науч. ред. А. В. Кушнарeва, А. А. Богатова. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. – С. 245–248.

15. Кузьмичев В. М. Производство осесимметричных изделий методами обработки металлов давлением / В. М. Кузьмичев, О. Н. Перков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ИЧМ НАН Украины, 2011. – Вып. 24. – С. 164–180.

16. Копперс У. Производство железнодорожных колёс на высоком

техническом уровне / У. Копперс, М. Кунц, М Линденблатт // Черные металлы. – 2006. – № 3. – С. 75–79.

17. Буркин С. П. О технике и технологии изготовления штампованных колес / С. П. Буркин // Современные технологии производства транспортного металла : материалы 3-й Междунар. конф. «Трансмет – 2007» / под науч. ред. А. В. Кушнарера, А. А. Богатова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – С. 206–214.

18. Леванов А. А. Совершенствование технологии штамповки железнодорожных колес / А. А. Леванов // Современные технологии производства транспортного металла: материалы 3-й Междунар. конф. «Трансмет – 2007» / под науч. ред. А. В. Кушнарера, А. А. Богатова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – С. 215–220.

19. Совершенствование технологииковки железнодорожных колес / С. А. Королев, Б. Ф. Антипов, В. П. Романенко [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – № 11. – С. 15–17.

20. Новая технология деформирования заготовок при производстве железнодорожных колес / О. А. Ганаго, М. С. Валетов, М. И. Староселецкий [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979. – № 2. – С. 8–11.

21. Прозоров Л. В. О возможности применения секционной штамповки для изготовления железнодорожных колес / Л. В. Прозоров, А. В. Алтыксин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 5. – С. 42–43.

22. Изготовление плоских осесимметричных заготовок торцевой раскаткой из сортового круглого профиля или толстостенных труб / Н. А. Комков, О. В. Ливанова, А. Н. Никулин, Г. А. Филиппов // Сталь. – 2012. – № 1. – С. 54–58.

23. Patent № 108237193 A China, IPC B21H 1/04. Train wheel rotary forging forming method : № 2018CN-0016783 : Application 09.01.2018 : Publ. date 03.07.2018 / Kou Shuqing, Tian Yanan, Chen Qingmin, Zhao Yong ; Applicant Jilin Univ. – 6 p.

24. Patent № 202461399 U China, IPC B21J 13/02. Train wheel forming mould : № 2012CN-U117305 : Application 27.03.2012 : Publ. date 03.10.2012 / Hua Lai, Jiping Huang, Kemin Feng [et al.] ; Sichuan New Construction Fine Unburnt Brick Forging Co Ltd. – 5 p.

25. Производство колес для железнодорожного подвижного состава // Железные дороги мира. – 2008. – № 11. – С. 75–78.
26. Колесные пары для различных секторов рынка // Железные дороги мира. – 2013. – № 12. – С. 34–38.
27. Производство цельнокатаных колёс в Японии // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1974. – № 23. – С. 63–64.
28. Recent improvements in wrought railroad wheel production at Standard Steel / C. P. Lonsdale, R. D. Swartzell. – DOI 10.1109/RRCON.2000.869988 // Proceedings of the 2000 ASME/IEEE Joint Railroad Conference, Newark, 6 April 2000 y. – 2000. – P. 63–66.
29. Forging and heat treating process upgrades for a wrought railroad wheel manufacturing facility / A. George, L. Cameron, J. Leghorn. – DOI <https://doi.org/10.1115/JRC2008-63046> // Proceedings of the 2008 IEEE/ASME Joint Rail Conference JRC2008, Wilmington, 22–24 April 2008 y. – 2008. – P. 179–185.
30. Вайнорюте В. В. Разработка технологии получения заготовки для железнодорожных колес на базе ТОО «Проммашкомплект» / В. В. Вайнорюте, И. Н. Дычко, А. В. Богомолов // Наука и техника Казахстана. – 2018. – № 1. – С. 41–53.
31. Яровой В. А. Совершенствование технологии производства новых видов железнодорожных колес в условиях ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод» / В. А. Яровой // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2006. – Вип. 13. – С. 136–140.
32. Особенности деформирования железнодорожных колес с плоскоконическими и криволинейными дисками / А. Я. Кузовков, В. Г. Кривоногов, И. Л. Пашолок, Ю. П. Петренко // Сталь. – 2002. – № 3. – С. 84–87.
33. Совершенствование процессов обработки металлов давлением при производстве колес в условиях ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод»

/ В. А. Яровой, А. В. Белущенко, И. М. Иващенко, А. И. Донской // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2005. – Т. 8 : Пластична деформація металів. – С. 557–560.

34. Исследование деформированного состояния заготовок на линии производства железнодорожных колес ОАО «ВМЗ» / М. А. Волков, А. В. Краснов, Д. Н. Лисин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2005. – № 4. – С. 82.

35. Тубольцев Ю. Г. Тенденции развития колесопрокатного производства на ОАО НТЗ / Ю. Г. Тубольцев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8/9. – С. 483–487.

36. Совершенствование технологии и расширение сортамента производства железнодорожных колес в условиях колесопрокатного цеха / Ю. Г. Тубольцев, А. В. Белущенко, В. В. Ганжа [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 7. – С. 70–72.

37. Фукуда С. Технология прокатки колес для электровозов в Японии / С. Фукуда // Дэнки киканся. – 1974. – № 219. – С. 15 – 22.

38. Данченко В. Н. Выбор технологической схемы многопереходной штамповки заготовок железнодорожных колес / В. Н. Данченко, Х. Дья, А.В. Шрамко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 1. – С. 58–61.

39. Increasing the productivity of a pressing-rolling line by combining the operations of upsetting and spreading on the 49-mn press / A. M. Volkov, V. A. Tarasova, A. A. Yandimirov, I. A. Sedyshev // Metallurgist. – 2008. – Vol. 32. – P. 229–234.

40. Патент № 2404877 Рос. Федерация, МПК С2 В21К 1/28, В21Н 1/04. Способ изготовления цельнокатаных железнодорожных колес : № 2007128170/02 : заявл. 24.07.2007 ; опубл. 27.11.2010 / Голышков Р. А., Крошкин В. А., Сорокин А. Н. [и др.] ; патентообладатель Яндимиров А. А. – 5 с.

41. Патент № 2259279 Рос. Федерация, МПК С1 В 60 В 3/02, 17/00, В 21 Н 1/04. Цельнокатаное железнодорожное колесо и способ его изготовления : № 2004100876/11 : заявл. 15.01.2004 : опубл. 27.08.2005. / Королев С.А., Волков А. М., Кондрушин А. И. [и др.] ; патентообладатель ОАО «Выксун. металлург. з-д». – 13

с.

42. Петренко Ю. П. Производство стали транспортного назначения на ОАО «НТМК» / Ю. П. Петренко, П. В. Эккерт // Современные технологии производства транспортного металла: материалы конференции «Трансмет – 2007» / под науч. ред. А. В. Кушнарера, А. А. Богатова. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. – С. 159–162.

43. ОАО «Нижеднепровский трубопрокатный завод» в свете современных мировых тенденций развития производства железнодорожных колес / А. И. Козловский, В. П. Есаулов, А. В. Шрамко, Л. В. Голубева // Metallurgical and Mining Industry. – 2004. – № 1. – С. 8–13.

44. Современное оборудование и способы порезки слитков на отдельные заготовки железнодорожных колес и бандажей / Е. И. Шифрин, А. В. Шрамко, В. Л. Мережко, Л. В. Голубева // Metallurgical and Mining Industry. – 2004. – № 1. – С. 48–52.

45. Wang Y. J. Research on Hot Forging Process of C-grade Steel Train Wheel by FEM / Y. J. Wang, G. Fang. – DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.160-162.492> // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 160–162. – P. 492–497.

46. Austenite Grain Size Evolution in Railway Wheel During Multi-Stage Forging Processes / X. Shen, J. Yan, L. Zhang [et al.] // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2013. – Vol. 20, Iss. 3. – P. 57–65.

47. Опыт освоения производства колес на новой прессопрокатной линии / А. В. Кушнарера, А. А. Киричков, В. Д. Шестак [и др.] // Сталь. – 2010. – № 12. – С. 44–46.

Introduction of wheel production on a new pressing and rolling line / A. V. Kushnarev, A. A. Kirichkov, V. D. Shestak [et al.] // Steel in Translation. – 2010. – Vol. 40, Iss. № 12. – P. 1098–1100.

48. Новая технология производства высококачественных железнодорожных колес / А. В. Кушнарера, А. А. Богатов, А. А. Киричков, Ю. П. Петренко // Сталь. – 2014. – № 3. – С. 58–62.

Production of high-quality railroad wheels / A. V. Kushnarev, A. A. Kirichkov, Y. P. Petrenko, A. A. Bogatov // *Steel in Translation*. – 2010. – Vol. 40, Iss. 3. – P. 268–272.

49. Патент № 2335373 Рос. Федерация, МПК С2 В21К 1/28, В21Н 1/04. Способ штамповки заготовок для цельнокатаных колес : № 2006128068/02 : заявл. 10.02.2008 : опубл. 10.10.08 / Кушнарєв А. В., Киричков А. А., Шестак В. Д. [и др.] ; патентообладатель ОАО «НТМК». – 7 с.

50. Патент № 98707 Україна, МПК С2 В21Н 1/04. Спосіб виробництва заготовок залізничних коліс із ободом, диском і маточиною : № а201013923 : заявл. 22.1.2010 : опубл. 11.06.2012 / Снітко С. О., Дужуржи О. О. ; правовласник «Донец. нац. техн. ун-т». – 7 с.

51. Патент № 102152 Україна, МПК С2 В21Н 1/04. Спосіб виготовлення колісних заготовок, що мають обід, диск і маточину / Яковченко О. В., Пугач О. О., Івлєва Н. І. : № а201112720 : заявл. 31.10.2011 : опубл. 10.06.2013 ; правовласники: Яковченко О. В., Пугач О. О., Івлєва Н. І. – 8 с.

52. Патент № 105080 Україна, МПК С2 В21Н 1/04, В21К 1/00, В21J 1/06. Спосіб виготовлення колісної заготовки з ободом, диском і маточиною / Снітко С. О. – № а201208100 : заявл. 02.07.2012 : опубл. 10.04.2014 : правовласник Снітко С. О. – 8 с.

53. Патент № 95031 Україна, МПК С2 В21К 1/00, В21Н 1/04, В21J 5/02. Спосіб гарячого об'ємного штампування повнопрофільних заготовок коліс для рейкового транспорту : заявл. 30.04.2010 : опубл. 25.06.2011 / Проїдак Ю. С., Назаренко М. В., Новохатній В. А. [та інші] ; правовласник Нац. металургійна акад. України. – 4 с.

54. Патент № 103425 Україна, МПК С2 В21Н 1/04, В21К 1/00, В21J 1/06. Спосіб виготовлення колісної заготовки : № а201209600 : заявл. 07.08.2012 : опубл. 10.10.13 / Снітко С. О., Яковченко А. О. ; правовласники: Снітко С. О., Яковченко А. О. – 8 с.

55. Патент № 86093 Україна, МПК С2 В21Н 1/00. Спосіб виготовлення колісних заготовок з ободом, диском і маточиною : № а200702738 : заявл. 15.03.2007 : опубл. 25.03.09 / Снітко С. О., Яковченко О. В. ; правовласники: Снітко

С. О., Яковченко О. В. – 5 с.

56. Патент № 841773 СССР, МПК С2 В21К 1/28, В21Н 1/04. Способ изготовления железнодорожных колес / Есаулов А. Т., Староселецкий М. И., Валетов М. С. [и др.] : № 2813048 : заявл. 23.08.1979 : опубл. 30.06.81 ; патентообладатель Нижнеднепр. трубопрокат. з-д им. К. Либкнехта. – 3 с.

57. Patent № 102114519 A China, IPC C1 B21K 7/12. Method for performing wheel of train : № 2010CN-0550248 : Application 17.11.2010 : Publ. date 06.07.2011 / Huiting Wang, Jie Cao, Jing Zhang [et al.] ; Applicant Anhui Technology Univ. – 8 p.

58. Patent № 101020287 A China, IPC B21H-001/02, B21H-001/22, B21J-005/00, B23P-015/14, C21D-009/32, C21D-011/00, F16H-055/00. Forging and rolling technology and hot rolling and forging apparatus for making large pulley : № 2007CN-0020516 : Application 06.03.2007 : Publ. date 22.08.2007 / Li Xiang, Yang Ningguo, Xie Feng ; Applicant Maanshan Iron & Steel Co. Ltd. – 13 p.

59. Patent № 104325838 A. China, IPC B23P-015/00, B60B-017/00. High-speed rail wheel and hot-extrusion integrated forming method thereof : № 2014CN-0562310 : Application 22.10.2014 : Publ. date 04.02.2015 / Lei Bangron ; Applicant Lei Bangrong. – 9 p.

60. Patent № 106270315 A. China, IPC B21H-001/02. Train wheel three-face roll forming method : № 2016CN-0920978 : Application 21.10.2016 : Publ. date 04.01.2017 / Pang Jinlong, Li Xiang, Xiao Feng [et al.] ; Applicant Maanshan Iron & Steel. – 7 p.

61. Патент № 2404009 Рос. Федерация, МПК С2 В21Н 1/04, В21К 1/28. Способ изготовления цельнокатаных железнодорожных колес : № 2008115847/02 : заявл. 21.04.2008 : опубл. 20.11.10 / Кушнарев А. В., Богатов А. А., Киричков А. А. [и др.] ; патентообладатель Открытое акционер. общ-во «Нижнетагил. металлург. комбинат». – 8 с.

62. Яковченко А. В. Совершенствование технологии штамповки колесных заготовок / А. В. Яковченко, А. А. Пугач, С. А. Снитко, Н. И. Ивлева // Вісник приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки». – 2012. – № 1 (24). – С. 94–99.

63. Снитко С. А. Совершенствование технологии и оборудования в

колесопрокатном производстве / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, А. Л. Сотников // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – № 4 (10). – С. 13–21.

64. Мамичев С. А. Совершенствование технологии осадки и разгонки колесных заготовок для колес диаметром 957 мм / С. А. Мамичев, С. А. Снитко // Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых», Донецк, 23–24 мая 2018 г. – Донецк : ДОННТУ, 2018. – С. 194–197.

65. Мамичев С. А. Повышение эффективности технологии штамповки колесных заготовок на старых линиях / С. А. Мамичев, С. А. Снитко // Сборник докладов V Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых», Донецк, 22 мая 2019 г. – Донецк : ДОННТУ, 2019. – С. 162–164.

66. Тульский А. Е. Совершенствование технологии штамповки колесных заготовок с гребнем / А. Е. Тульский, С. А. Снитко // Сборник докладов V Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Металлургия XXI столетия глазами молодых», Донецк, 22 мая 2019 г. – Донецк : ДОННТУ, 2019. – С. 142–145.

67. Кушнарв А. В. Математическое моделирование черновой и чистовой штамповки непрерывнолитых заготовок, используемых при производстве железнодорожных колес / А. В. Кушнарв, А. А. Богатов, В. А. Кропотов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2010. – № 1. – С. 34–38.

68. Модернизация производства железнодорожных колес на Нижнетагильском металлургическом комбинате / А. В. Кушнарв, А. А. Киричков, В. М. Камардин, А. Р. Иваницкий // Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – № 7. – С. 33–35.

69. Богатов А. А. Особенности конструирования гравюры инструмента деформации при предварительной штамповке заготовки при производстве железнодорожных колес / А. А. Богатов, С. С. Пузырев // Труды XXII Международной научно-практической конференции «Трубы – 2016»

«Инновации и импортозамещение в трубной промышленности» : сб. док., Челябинск, 20–22 сент. 2016 г. – Челябинск : РосНИТИ, 2016. – Ч. 2. – С. 178–180.

70. Кушнарев А. В. Определение влияния параметров заготовки на формоизменение черного колеса при штамповке методом компьютерного моделирования / А. В. Кушнарев, С. С. Пузырев // Черные металлы. – 2020. – № 6 (1062). – С. 31–36.

71. Мигачев Б. А. Моделирование технологической деформируемости / Б. А. Мигачев. – Екатеринбург : УрО РАН, 1994. – 88 с.

72. Янагимото Т. Применение пластилина для изучения процессов горячей прокатки стали / Т. Янагимото, Х. Моритани, Х. Цутя // Tetsu-to-hagane. – 1977. – Vol. 63, Iss. 4. – P. 208.

73. Исследование формоизменения и сопротивления деформации металла при производстве колесной заготовки / А. В. Кушнарев, Г. П. Перунов, А. А. Киричков [и др.] // Сталь. – 2010. – № 5. – С. 86–88.

74. Kim N. Ring rolling process simulation by the three dimensional finite element method / N. Kim, S. Machida, S. Kobayashi. – DOI [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(90\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0890-6955(90)90008-7) // International Journal Machine Tools Manufacture. – 1990. – Vol. 30, Iss. 4. – P. 569–577.

75. Ward M. J. Simulation of a multi-stage railway wheel and tyre forming process / M. J. Ward, B. C. Miller, K. Davey. – DOI [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00140-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00140-X) // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – Vol. 80/81. – P. 206–212.

76. Davey K. Efficient strategies for the simulation of railway wheel forming / K. Davey, B. C. Miller, M. J. Ward. – DOI [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00985-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00985-2) // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 118, Iss. 1/3. – P. 389–396.

77. Davey K. The practicalities of ring rolling simulation for profiled rings / K. Davey, M. J. Ward. – DOI [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00356-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00356-4) // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 125/126. – P. 619–625.

78. Davey K. A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation / K. Davey, M. J. Ward. – DOI <https://doi.org/10.1016/S0020->

7403(01)00080-7 // International Journal of Mechanical Sciences. – 2002. – Vol. 44, Iss. 1. P. 165–190.

79. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. – Москва : Мир, 1984. – 42 с.

80. Solomonov K. N. Review of software for simulation of metal forming processes / K. N. Solomonov, L. I. Tishchuk // XV International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering: collective monograph on the». – Częstochowa : Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej, 2014. – P. 287–291. – ISBN 978-83-63989-17-0.

81. Исследование напряженного состояния формовочных штампов и условий контактного трения с помощью компьютерного моделирования при штамповке заготовок железнодорожных колес / В. Н. Данченко, Х. Дья, А. В. Шрамко [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2012. – № 46 (952). – С. 26–32.

82. Снитко С. А. Конечно-элементное моделирование процесса деформирования заготовок при производстве железнодорожных колес / С. А. Снитко, В. Л. Калюжный // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудовання». – 2010. – Вип. 62. – С. 53–62.

83. Analysis of railway wheel rolling process based on three-dimensional simulation / X. Shen, J. Yan, T. An, Z. Xu, J. Zhang. – DOI 10.1007/s00170-014-5637-6 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 72, Iss. 1. – P. 179–191.

84. Optimization of multi-stage closed-die forging processes by coupled simulation of the machine and the forging processes / C. Brecher, W. Klein, M. Tannert // Production engineering: research and development. – 2010. – Vol. 4, Iss. 2/3. – P. 279–286.

85. Hambleton J. P. On modeling a rolling wheel in the presence of plastic deformation as a three- or two-dimensional process / J. P. Hambleton, A. Drescher. – DOI

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.09.024> // International Journal of Mechanical Sciences. – 2009. – Vol. 51, Iss. 11/12. – P. 846–855.

86. Rosochowski A. A method of forming oblique rings / A. Rosochowski, M. Rosochowska, L. Olejnik. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.041> // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – P. 568–573.

87. Снитко С. А. Математическая модель процесса штамповки колесных заготовок / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, Н. И. Ивлева // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Металургія». – 2007. – Вип. 9 (122). – С. 156–165.

88. Biba N. Simulation of recrystallisation and grain size evolution in hot metal forming / N. Biba, A. Borowikov, D. Wehege. – DOI <https://doi.org/10.1063/1.3589503> // AIP Conference Proceedings. – 2011. – Vol. 1353, Iss. 1. – P. 127–132.

89. Ha M.-T. Fatigue Analysis of Railway Wheels according to UIC Standards / M.-T. Ha, K. Chul-Goo // 12th International Conference on Control, Automation and Systems, Jeju Island, 17–21 Oct. 2012 y. – Jeju : IEEE, 2012. – P. 112–116.

90. Okagata Y. Design Technologies for Railway Wheels and Future Prospects / Y. Okagata // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. – 2013. – Iss. 105. – P. 26–33.

91. Компьютерное моделирование деформации железнодорожных колес без диска / В. А. Гринкевич, В. Г. Палиенко, А. Г. Ступка [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 5. – С. 33–36.

92. Совершенствование технологии штамповки заготовок железнодорожных колес с помощью математической модели / А. А. Миленин, В. Н. Данченко, А. В. Шрамко [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 4. – С. 3–37.

93. Шестаков Н. А. Технология получения объемных заготовок с мелкозернистой структурой / Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, А. В. Шукшин // Кузнечноштамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 8. – С. 19–23.

94. Advanced interface models for metal forming simulations / S. R. Schmid, J.

Liu, M. A. Selles, T. Pasang. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.07.025> // Computational Materials Science. – 2013. – Vol. 79. – P. 763–771.

95. Голышков Р. Оптимизация технологических процессов колесопрокатного производства с помощью программного комплекса DEFORM / Р. Голышков, А. Латаев, А. Харламов // САПР и графика. – 2006. – № 7. – С. 73–75.

96. Галкин Е. В. Исследование процесса производства железнодорожных колес методом конечных элементов / Е. В. Галкин, А. А. Харламов, Р. А. Голышков // Metallurgy машиностроения. – 2008. – № 3. – С. 47–48.

97. Experiment an Simulation of Metal Flow in Multi-stage Forming Process of Railway Wheel / X. Shen, W. Chen, J. Yan [et al.] // Journal of Iron and Steel Research International. – 2015. – Vol. 22, Iss. 1. – P. 21–29.

98. Коробова Н. В. Применение программного комплекса DEFORM 3D для исследования холодного выдавливания стаканов из спеченных порошковых заготовок / Н. В. Коробова, М. Д. Петров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 4. – С. 25–27.

99. Компьютерное моделирование технологических процессов обработки давлением конструкционных сверхпластичных материалов / В. Р. Ганиева, О. П. Тулупова, Ф. У. Еникеев, А. А. Круглов // Вестник машиностроения. – 2014. – № 2. – С. 63–69.

100. Three-dimensional finite element analysis of multi-stage hot forming of railway wheels / T. Gangopadhyay, R. K. Ohdar, D. K. Pratihari, I. Basak. – DOI 10.1007/s00170-010-2810-4 // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 53, Iss. 1/4. – P. 301–312.

101. Кушнарев А. В. Совершенствование технологии производства железнодорожных колес на основании математического моделирования процесса формоизменения металла при штамповке / А. В. Кушнарев, А. А. Богатов, А. А. Киричков // Современные технологии производства транспортного металла: материалы 3-й Междунар. конф. «Трансмет – 2007» / под науч. ред. А. В. Кушнарева, А. А. Богатова. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. – С. 253–255.

102. Романенко В. П. Компьютерное моделирование деформации сплошной

и полых колесных заготовок на прессах / В. П. Романенко, А. В. Фомин, А. А. Яндимиров // *Металлург.* – 2011. – № 7. – С. 62–65.

Romanenko V. P. Computer modeling of the deformation of solid and hollow semifinished wheels on presses / V. P. Romanenko, A. V. Fomin, A. A. Yandimirov // *Metallurgist.* – 2011. – Vol. 55. – P. 500–503.

103. Исследование температуры и деформации в штампованных поковках при производстве железнодорожных колес / А. В. Кушнарев, А. А. Богатов, Ю. П. Петренко, В. А. Кропотов // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2010. – № 6. – С. 16–21.

104. Романенко В. П. Исследование формоизменения металла при деформации на прессах сплошной и полый заготовок методом компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM 3D / В. П. Романенко, А. В. Фомин, Г. П. Илларионов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2012. – № 3. – С. 59–62.

105. 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 : ДГМА, 2010. – Вып. 1 (22).* – С. 44–48.

106. Снитко С. А. Совершенствование технологии штамповки колесных заготовок / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, Н. И. Ивлева // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2008. – № 1. – С. 67–71.

107. Романенко В. П. Моделирование технологического процесса формовки заготовок для железнодорожного колеса методом конечных элементов / В. П. Романенко, А. А. Золотарев // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2013. – № 5. – С. 63–66.

108. Ильиных Р. А. Опыт применения программного комплекса Deform 3D для оптимизации режимов предварительной и чистовой штамповки при производстве цельнокатаных колес / Р. А. Ильиных, А. А. Богатова, М. В. Миронова // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической*

информации. – 2018. – № 7. – С. 49–55.

109. Снитко С. А. Силовые режимы работы формовочного прессы при штамповке колёсных заготовок / С. А. Снитко, А. Л. Сотников, А. В. Яковченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2018. – № 10 (53). – С. 57–63.

110. Снитко С. А. Износ инструмента деформации при штамповке колесных заготовок / С. А. Снитко, А. Л. Сотников, А. В. Яковченко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – № 2 (12). – С. 9–14.

111. Снитко С. А. Взаимосвязь режимов прокатки с нагрузками и запасом прочности наклонных валков колесопрокатных станов горизонтального и вертикального типов / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, А. Л. Сотников // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – № 3 (9). – С. 14–29.

112. Snitko S. Features finite-element modeling of the deformation exact vass / S. Snitko, A. Duzhurzhi. – DOI <https://doi.org/10.1166/jctn.2012.2234> // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2012. – Vol. 9, Iss. 9. – P. 1505–1510.

113. Снитко С. А. Конечно-элементное моделирование многопереходного процесса деформирования заготовок при производстве железнодорожных колес / С. А. Снитко, В. Л. Калюжный // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия «Машиностроение». – 2011. – Вып. 62. – С. 106–111.

114. Снитко С. А. Влияние схем штамповки колесных заготовок на силовые режимы работы формовочного прессы и износ инструмента деформации / С. А. Снитко, А. В. Яковченко, А. А. Сотников // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – № 5 (61). – С. 385–392.

115. Снитко С. А. Механизм исправления асимметрии при штамповке колесных заготовок / С. А. Снитко, А. В. Яковченко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА. – 2012. – № 4 (33). – С. 95–99.

116. Структурно-деформационный анализ производства заготовок железнодорожных колес методом математического моделирования / В. В. Галкин,

А. Б. Калинин, Д. А. Доронин, Г. В. Пачурин // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 4-1. – С 18–23.

117. Пузырев С. С. Совершенствование технологии черновой и чистовой штамповки в условиях ППЛ КБЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК» / С. С. Пузырев, А. А. Богатов // *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : материалы междунар. молодежной науч.-практ. конф. «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении»*, Екатеринбург, 26–30 нояб. 2013 г. . – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. – 2014. – С. 499–501.

118. Bogatov A. A. Technological advancement of roughing and finishing punching on the PRL WBS OJSK «EVRAZ NTMK» / A. A. Bogatov, S. S. Puzyrev // *XV International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering: collective monograph on the»*. – Częstochowa : Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej, 2014. – P. 287–291.

119. Кушнарев А. В. Разработка методики расчета формоизменения заготовки по переходам изготовления железнодорожных колес на основе компьютерного моделирования технологических процессов. / А. В. Кушнарев, А. А. Богатов, С. С. Пузырев // *Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2015) : тр. 11 Междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 23–27 июня 2015 г. / ред. А. И. Рудской*. – Санкт-Петербург : Изд-во Политех. ун-та, 2015. – Т. 3. – С. 362–377. – ISBN 978-5-7422-4946-7.

120. Кушнарев А. В. Развитие технологии производства железнодорожных колес / А. В. Кушнарев, А. А. Богатов, А. А. Киричков, С. С. Пузырев // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. – 2016. – Т. 14, № 1. – С. 59–68.

121. Кушнарев А. В. Модернизация технологии производства железнодорожных колес в АО «ЕВРАЗ НТМК» / А. В. Кушнарев, А. А. Киричков, А. А. Богатов, С. С. Пузырев // *Металлург*. – 2016. – № 10. – С. 72–78.

Kushnarev A. V. Modernization of railroad wheel manufacturing technology at EVRAZ NTMK / A. V. Kushnarev, A. A. Kirichkov, A. A. Bogatov, S. S. Puzyrev //

Metallurgist. – 2017. – Vol. 60, Iss. 9/10. – P. 1080–1086.

122. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением : учебник / В. Л. Колмогоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ. – 2001. – 836 с. – ISBN 5-321-00050-6.

123. Паршин В. С. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D : учеб. пособие / В. С. Паршин, А. П. Карамышев, И. И. Некрасов [и др.]. – Екатеринбург : УрФУ. – 2010. – 266 с. – ISBN 978-5-321-01772-2.

124. ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия : межгос. стандарт : взамен ГОСТ 10791–2004, ГОСТ 9036–88 : дата введ. 2012–01–01. – Москва : Стандартиформ. 2011. – IV, 27 с.

125. Деминг Э. Выход из кризиса. Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деменг. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2007. – 370 с. – (Модели менеджмента ведущих корпораций). – ISBN 978-5-9614-0567-5.

126. ГОСТ Р ИСО 7870–2–2015. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта : нац. стандарт Рос. Федерации : взамен ГОСТ Р 50779.42–99 (ИСО 8258–91) : дата введ. 2015–06–10. – Москва : Стандартиформ, 2016. – IV, 42 с. – (Статистические методы).

127. Менеджмент : учеб. пособие / В. И. Подлесных, В. Абакумов, А. А. Голубев [и др.]. – 2-е изд., доп. и перераб. – Санкт-Петербург : Бизнес-пресса, 2002. – 472 с. – ISBN 5-8110-0003-3.

128. Прохоров Ю. К. Управление качеством : учеб. пособие / Ю. К. Прохоров. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2007. – 144 с.

129. Применение статистических методов для совершенствования контроля и управления технологическими процессами и качеством продукции / О. А. Черкас, А. Д. Любущенко, А. В. Пастухов [и др.] // Горный журнал. – 2010. – № 8. – С. 59–62.

130. Шарашкина Т. П. Статистический контроль производственного процесса в системе контроля производственных процессов предприятия / Т. П. Шарашкина // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. – 2015. – № 3 (34). – С. 83–90.

131. Статистическое управление процессами, как способ снижения производственных затрат и повышения качества продукции / С. Б. Егоров, Д. А. Локтев, А. В. Капитанов [и др.] // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 5, ч. 3 (14). – С. 51–55.

132. Ужесточение требований к качеству железнодорожных колес в проекте нового межгосударственного стандарта и меры по их обеспечению на НТМК / А. А. Дерябин, А. В. Кушнарев, В. А. Рабовский [и др.] // Сталь. – 2004. – № 5. – С. 92–93.

133. Киричков А. А. Опыт внедрения статистического контроля процессов производства в условиях колесобандажного цеха АО "ЕВРАЗ НТМК" / А. А. Киричков, Н. В. Теляшов, В. В. Галченков, С. С. Пузырев // Черные металлы. – 2018. – № 7. – С. 27–31.

## ПРИЛОЖЕНИЕ П1



ТЕХНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

УТВЕРЖДАЮ  
И.о. Технического директора  
ЕВРАЗ НТМК  
П.А. Зажигаев  
«18» 08 2016 г.

## ПРОГРАММА ОПР № ОПРНТ 16/0084

«Отработка калибровки для производства колес Ø 957 мм по ГОСТ 10791-2011  
(чертеж 00186269-162)»

Цель:

1. Оптимизация массы штучной заготовки под прокат.
2. Снижение нагрузки на пресс R9000.

Калибровка изменяется на прессе R5000 с целью совмещения процесса осадки заготовки, разгонки и калибровки для формирования заготовки с поверхностью сопряженной с частью поверхности нижнего штампа прессы R9000 для обеспечения самоцентрирования черновой заготовки. При расчете калибровки используются предложения ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

ОПР проводится в два этапа, на первом этапе практически подтверждается правильность теоретического обоснования изменения калибровки, второй этап проводится при положительных результатах первого этапа.

№ п/п	Наименование этапа, содержание работ	Срок выполнения	Ответственное структурное подразделение – исполнитель
1	2	3	4
Первый этап			
1 Подготовительные работ			
1.1	Расчет калибровки прессы R5000 и определение массы исходной заготовки (m опыт) для производства колес диаметром 957 мм (черт 00186269-162). Разработка чертежей на инструмент деформации. Выдача чертежей на изготовление.	30.09.2016	КБЦ Васильев А.А.
1.2	Выдача заказа и заявки в УГМ на изготовление комплекта инструмента деформации.	08.10.2016	КБЦ Теплов В.Ю. Пузырев С.С.
1.3	Изготовление комплекта инструмента деформации.	30 дней с момента выдачи заявки	УГМ Зудов А.А.

1	2	3	4
2 Проведение исследований			
2.1	Порезка поплавночно 20-30 штучных заготовок из стали марки 2-У (используется металл на настройку) на массу штучной заготовки (m опыт), определенной в пункте 1.1, с провеской каждой заготовки и составлением протокола, в котором указывается номер заготовки по порядку порезки и масса данной заготовки.	Ноябрь 2016 г.	КБЦ Теплов В.Ю. Пузырев С.С.
2.2	Подготовительные работы к прокату. До проката выполняется центровка прессов №1, 2, прокат штучных заготовок для замера по стандартной технологии. Результаты проката замеров регистрируются в журнале.		КБЦ Теплов В.Ю. Пузырев С.С.
2.3	Прокат порезанных опытных заготовок ведется отдельной партией, при этом прокат провешенных заготовок осуществляется по порядку порезки заготовок. В процессе проката откладываются не менее чем по две штучные деформированные заготовки после прессов 1, 2. Прокат штучных заготовок производится в соответствии с требованиями ТИ 102-П.СП-117-2015. После проката опытные позиции инструмента осматриваются. Регистрируются силовые параметры прессов 1, 2.		КБЦ Теплов В.Ю. Пузырев С.С.
2.4	Контроль геометрических параметров всех опытных черновых колес до проведения термообработки.		КБЦ Теплов В.Ю. Пузырев С.С. УТК Черенкова Т.И.
2.5	Термообработка колес - по технологической инструкции ТИ 102-П.СП-185-2016.		КБЦ Трощенко Н.М.
2.6	Контроль геометрических параметров всех опытных черновых колес после проведения термообработки.		КБЦ Щербинин А.В. Теплов В.Ю. Пузырев С.С. УТК Черенкова Т.И.
2.7	Корректировка программы механической обработки, опытно-промышленная обработка колес. Механическая обработка и приемка колес - по ТИ 102-П.СП-112-2013, ТИ 102-П.СП-198-2012		КБЦ Щербинин А.В.
2.8	Осмотр и контроль геометрии колес на СВК.		КБЦ Щербинин А.В. УТК Черенкова Т.И.
3 Анализ полученных результатов			
3.1	Оценка качества колес.	Декабрь 2016 г	ТУ Аввакумов С.Б.

ПРОГРАММА ОПР № ОПРНТ 16/0084	3
-------------------------------	---

1	2	3	4
3.2	Оформление заключения и выдача рекомендаций.	Декабрь 2016 г.	ТУ Аввакумов С.Б.
3.3	При необходимости производится корректировка калибровки, уточнение массы штучной заготовки и изготовление инструмента деформации.	Декабрь 2016 г.	КБЦ Щербинин А.В. ТУ Аввакумов С.Б.
Второй этап			
4 Подготовительные работы			
4.1	Выдача заказа и заявки в УГМ на изготовление комплекта инструмента деформации (при необходимости Выдача заказа и заявки в УГМ на изготовление комплекта инструмента деформации).	Январь 2017 г.	КБЦ Щербинин А.В. Теплов В.Ю. Пузырев С.С. УГМ Зудов А.А
4.2	Изготовление комплекта инструмента деформации.	30 дней с момента выдачи за- явки	УГМ Зудов А.А.
5 Проведение исследований			
5.1	Порезка 90-100 штучных заготовок из стали марки 2-У на массу штучной заготовки (m опыт), определенной в пункте 3.3, с провеской каждой заготовки и составлением протокола, в котором указывается номер заготовки по порядку порезки и масса данной заготовки.	Март 2017 г.	КБЦ Теплов В.Ю. Пузырев С.С.
5.2	Прокат порезанных опытных заготовок ведется отдельной партией, при этом прокат провешенных заготовок осуществляется по порядку порезки заготовок.		КБЦ Теплов В.Ю. Пузырев С.С.
5.3	Прокат штучных заготовок производится в соответствии с требованиями ТИ 102-П.СП-117-2015. Регистрируются силовые параметры прессов 1, 2.		КБЦ Теплов В.Ю. Пузырев С.С.
5.4	Контроль геометрических параметров всех опытных черновых колес до проведения термообработки.		КБЦ Щербинин А.В. Теплов В.Ю. Пузырев С.С. УТК Черенкова Т.И.
5.5	Термообработка колес - по технологической инструкции ТИ 102-П.СП-185-2016.		КБЦ Трощенко Н.Т.
5.6	Контроль геометрических параметров всех опытных черновых колес после проведения термообработки.		КБЦ Щербинин А.В. УТК Черенкова Т.И.
5.7	Корректировка программы механической обработки, опытно-промышленная обработка колес.		КБЦ Щербинин А.В.
5.8	Механическая обработка и приемка колес - по ТИ 102-П.СП-112-2013, ТИ 102-П.СП-185-2016, ТИ 102-П.СП-198-2012.		КБЦ Щербинин А.В. УТК Черенкова Т.И.

ПРОГРАММА ОПР № ОПРНТ 16/0084	4
-------------------------------	---

1	2	3	4
6 Анализ полученных результатов			
6.1	Оценка качества колес.	Апрель 2017 г.	КБЦ Щербинин А.В. УТК Черенкова Т.И.
6.2	Оформление заключения и выдача рекомендаций.	10 дней после оконча- тельной приемки всех колес партии	ТУ Аввакумов С.Б.
6.3	Расход сырья, основных и вспомогательных материалов учитываются КБЦ и УЭП как плановые для продукции, произведённой по опытной технологии. Колёса, произведённые по настоящей программе и не подлежащие отгрузке потребителю, учитываются как пробы.		ТУ Аввакумов С.Б. КБЦ Галченков В.В. УЭП Мельникова И.В. УТК Хрипко В.И.

#### ТРЕБОВАНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ:

Все работы должны проводиться в соответствии с требованиями:

Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при получении, транспортировании, использовании расплавов черных и цветных металлов и сплавов на основе этих расплавов», утвержденные Приказом Ростехнадзора от 30.12.2013 № 656;

Федерального закона от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»;

ОТИ 102-1-2015 «Инструкция по охране труда для всех работников комбината» и инструкций по охране труда, технологических инструкций согласно перечням для проведения инструктажей по профессиям в КБЦ, ТУ.

Ответственными за охрану труда, промышленную безопасность и инструктаж перед проведением опытных работ являются:

от ТУ	Начальник отдела транспортного металла и освоения новых продуктов	Н.В. Теляшов
от КБЦ	Заместитель начальника КБЦ по технологии	А.В. Щербинин

## ПРИЛОЖЕНИЕ П2



УТВЕРЖДАЮ  
Технический директор ЕВРАЗ НТМК

Д.А. Кошкарлов  
« 02 » 2022

## АКТ

промышленной апробации калибровки для производства колес диаметром 957 мм по ГОСТ 10791-2011

В течение 2017-2018 гг. на участке по горячему прокату колесобандажного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК» была проведена программа ОНР №ОНРНТ 16/0084 «Отработка калибровки для производства колес диаметром 957 мм по ГОСТ 10791-2011 (чертеж 00186269-162)».

В соответствии с программой, выполнена промышленная апробация опытной калибровки, которая обеспечивает операцию разгонки металла на этапе предварительной штамповки, при производстве колес диаметром 957 мм из стали марки 2, с целью оптимизации массы штучной заготовки и снижению энергосиловых параметров работы прессы R-9000.

В соответствии с данной программой были сформированы и прокатаны две партии заготовок:

- сравнительная партия для производства цельнокатаных колес по существующей технологии (30 шт.);
- опытная партия с обеспечением разгонки металла на этапе предварительной штамповки (30 шт.).

Анализ полученных результатов показал:

1. Технология предварительной штамповки с обеспечением разгонки при данной операции, прошедшая апробацию на участке по горячему прокату колесобандажного цеха, обеспечивает производство цельнокатаных железнодорожных колес в соответствии с требованиями нормативной документации и с высокими качественными показателями.

2. Анализ энергосиловых параметров показал, что наиболее эффективной с точки зрения равномерности распределения усилий по прессам является калибровка опытной партии заготовок.

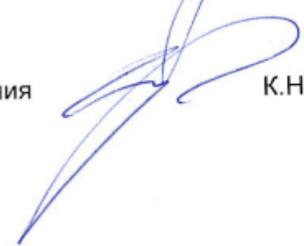
АО «ЕВРАЗ НТМК» подтверждает, что Пузырев Сергей Сергеевич (научный руководитель от «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» д.т.н. Шварц

Данил Леонидович) принимал активное участие по подготовке и выполнению работ согласно программе ОПР №ОПРНТ 16/0084 «Отработка калибровки для производства колес диаметром 957 мм по ГОСТ 10791-2011 (чертеж 00186269-162)».

Начальник колесобандажного цеха

 А.В. Мартынов

Начальник технического управления

 К.Н. Шведов