

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

На правах рукописи

Крискович Сергей Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ПРОИЗВОДСТВА ПОЛЫХ ВАГОННЫХ ОСЕЙ ИЗ  
ОСОБОТОЛСТОСТЕННЫХ ЗАГОТОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ВИНТОВОЙ  
ПРОШИВКОЙ

Специальность 2.6.4 – «Обработка металлов давлением»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: к.т.н., профессор В.П. Романенко

Москва, 2024

## Содержание

|   | стр |
|---|-----|
| Введение  | 4   |
| Глава 1. Литературный обзор   | 9   |
| 1.1 Современное состояние производства вагонных осей в России и за рубежом  | 9   |
| 1.2 Технологии производства вагонных осей   | 12  |
| 1.3 Исходные материалы и заготовки, применяемые при производстве вагонных осей  | 22  |
| 1.4 Совершенствование технологии производства осей для повышения эксплуатационных свойств   | 25  |
| Глава 2. Опытно-промышленные исследования получения особотолстостенных заготовок  | 32  |
| 2.1 Методика исследований (характеристика оборудования и условия проведения эксперимента)   | 32  |
| 2.2 Анализ экспериментальных данных   | 43  |
| Глава 3. Исследование деформации оправочного стержня, а также напряжённо-деформированного состояния заготовки при прошивке средствами компьютерного моделирования | 49  |
| 3.1 Изучение деформации оправочного стержня   | 49  |
| 3.2 Постановка задачи и создание модели очага деформации  | 51  |
| 3.3 Исследование напряженно-деформированного состояния.   | 56  |
| 3.4 Проведенные исследования и анализ результатов моделирования НДС   | 57  |
| Глава 4. Промышленное апробирование технологии производства полых вагонных осей   | 69  |
| 4.1 Получение исходных заготовок для прошивки   | 69  |
| 4.2 Изготовление полых осевых заготовок методом винтовой прошивки   | 72  |

|  |     |
|--|-----|
| 4.3 Изготовление черновых и чистовых полых вагонных осей                                       | 88  |
| 4.4 Исследование механических свойств металла осей на различных этапах производственного цикла | 95  |
| 4.5 Технические предложения по внедрению разработанной технологии                              | 103 |
| Основные выводы по работе  | 107 |
| Список использованных источников   | 109 |
| Приложение А   | 120 |
| Приложение Б   | 121 |
| Приложение В   | 123 |

## **Введение**

### **Актуальность темы**

В настоящее время большая часть подвижного состава пассажирских и грузовых поездов эксплуатируются с применением осей сплошного сечения. Полые вагонные оси с отверстием постоянного диаметра используются только на подвижном составе локомотивов и высокоскоростных пассажирских поездов. Это обусловлено тем, что полая конструкция вагонных осей позволяет регулярно проводить дефектоскопию методом УЗК без разборки буксового узла и демонтажа колесной пары. Однако для полых осей, в связи с выполнением центрального отверстия методом глубокого сверления, характерны следующие существенные недостатки: более высокая стоимость в сравнении со сплошными осями, длительный производственный цикл изготовления. Эти особенности препятствуют широкому распространению полых вагонных осей на всём парке подвижного состава, а не только на локомотивах и высокоскоростных пассажирских поездах.

Актуальной задачей является разработка рациональной технологии производства полых вагонных осей, обладающих сравнимым коэффициентом усталостной прочности и уровнем механических свойств со сплошными, а также не имеющих основных недостатков, связанных с существующей технологией их изготовления.

### **Цель и задачи работы**

Целью диссертационной работы является разработка технологического процесса производства полых вагонных осей с переменным сечением типа РУ1Ш из особотолстостенной полой заготовки, полученной винтовой прошивкой.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Провести анализ существующих способов производства сплошных и полых вагонных осей, предъявляемых к ним требований в соответствии со стандартами и актуальных направлений исследований по данной тематике.
2. Выполнить экспериментальные исследования по получению осбоголстостенных заготовок из осевой стали (ОС) методом винтовой прошивки на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д при различных значениях параметров угла подачи и коэффициента вытяжки. Осуществить анализ полученных результатов и провести оценку геометрических параметров полученных заготовок.
3. Исследовать выходную сторону прошивного-раскатного стана ТПА 70-270 и деформацию оправочного стержня при расчётной нагрузке методом компьютерного моделирования с целью оценки возможности получения точных осбоголстостенных осевых заготовок.
4. Провести компьютерное моделирование процесса винтовой прошивки для исследования влияния угла подачи на напряженно-деформированное состояние заготовки при помощи программного комплекса Qform, оценить влияние винтовой прошивки на проработку структуры заготовки и выработать рекомендации по настройке очага деформации для апробации технологии.
5. Разработать технологический процесс производства полых вагонных осей радиальной ковкой из прошитой на стане винтовой прокатки заготовки и осуществить его апробацию в промышленных условиях. Провести исследование свойств полученных полых вагонных осей.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Определена последовательность технологических операций для изготовления полых вагонных осей с применением методов винтовой прошивки и радиальной ковки.
2. Установлено влияние значений угла подачи и коэффициента вытяжки на параметр разностенности осбоголстостенных заготовок.

3. Экспериментально показана возможность изготовления полых вагонных осей радиальной ковкой на дорне из особотолстостенных заготовок с соотношением  $D/S=3.4$ , прошитых в стане винтовой прокатки.

4. Показано положительное влияние использования прошитой особотолстостенной заготовки на проработку структуры и пластические свойства стали вагонных осей с сохранением уровня прочностных характеристик.

### **Практическая значимость работы**

Результаты исследований по изготовлению особотолстостенных осевых заготовок позволили разработать и апробировать технологический процесс производства полых вагонных осей в условиях ПАО «Мотовилихинские заводы» из заготовок, полученных винтовой прокаткой на ТПА 70-270 АО ВМЗ. Полученные полые оси удовлетворяют требованиям ГОСТ для сплошных осей по всем параметрам.

Результаты работы использованы в процессе обучения студентов НИТУ МИСИС и ВФ НИТУ МИСИС по направлениям «Металлургия» и «Технологические машины и оборудование».

### **Методики и методы исследований**

Создание модели валков, направляющих линеек, оправки, оправочного стержня, заготовки и сборка очага деформации проводилась при помощи программного комплекса SolidWorks. Исследование устойчивости оправочного стержня осуществлялось в модуле SolidWorks Simulation.

Компьютерное моделирование процесса прошивки заготовки и раскатки гильзы в двухвалковом стане осуществлялось методом конечно-элементного моделирования в программе QForm.

Экспериментальная прошивка проводилась на опытно-промышленном стане МИСИС-130Д и промышленном ТПА 70-270 АО ВМЗ по

разработанным настройкам очага деформации в соответствии с предлагаемой технологией.

Испытания на растяжение и ударную вязкость выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78.

**Достоверность полученных результатов обеспечивается** использованием современных технических средств и оборудования, применением экспериментальных и теоретических методов исследования, математической обработкой данных с использованием вычислительной техники. Промышленное апробирование подтвердило адекватность полученных результатов.

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

1. Результаты экспериментальных исследований процесса прошивки на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д заготовок из стали ОС диаметром 90 мм в особотолстостенные гильзы размером  $D \times S = 85 \times 28$  мм,  $85 \times 25$  мм и  $85 \times 22$  мм.

2. Технологические режимы прошивки особотолстостенных заготовок  $D \times S = 237 \times 70$  мм на стане винтовой прокатки ТПА 70-270.

3. Технологический процесс изготовления полых вагонных осей в условиях ПАО «Мотовилихинские заводы» из особотолстостенных заготовок, полученных винтовой прокаткой на ТПА 70-270 АО ВМЗ.

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: студенческая научно-техническая конференция «70-е дни науки студентов НИТУ «МИСиС» (Москва: НИТУ «МИСиС», 2015), конкурс У.М.Н.И.К. (г.Москва, 2015 ), IX научно-практическая конференция молодых специалистов АО "ОМК" им. С.З. Афонина (Выкса, 2016 г.), IV

Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы в машиностроении» (Новосибирск, 2017), Magnitogorsk Rolling Practice 2018 (Магнитогорск, 2018).

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Диссертация по своей тематике целям, задачам, научной новизне теоретической и практической значимости, методологии и методам исследования, положениям, выносимым на защиту, соответствует паспорту специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением по п.1-3, 6.

## **Публикации**

Основное содержание диссертационной работы отражено в 11 печатных работах, в том числе в 4 изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 в базе цитирования WoS/Scopus.

## **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка использованных источников. Основное содержание работы изложено на 123 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка, 34 таблицы, список литературы включает 104 наименования.

## Глава 1. Литературный обзор

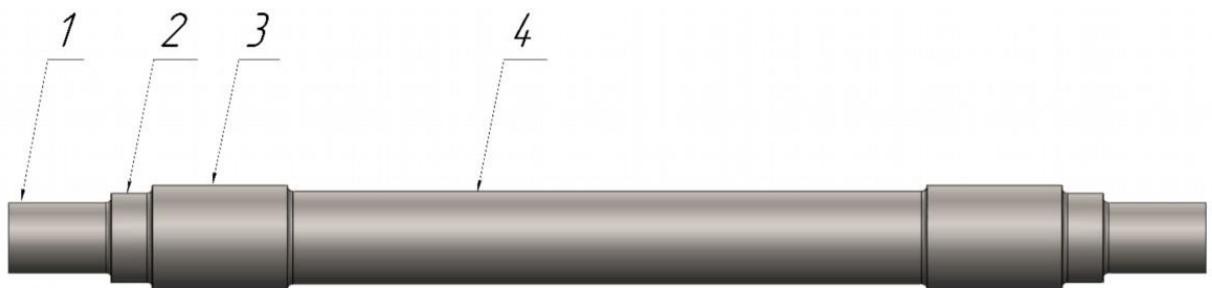
Одним из основных направлений развития инфраструктуры России, является развитие железнодорожного транспорта, обеспечивающее потребности современной экономики, и решение задач, предъявляемых модернизационным курсом правительства страны. Развитие ОАО «Российские железные дороги» нацелено на введение в эксплуатацию инновационных вагонов, а также железных дорог как для смешанного, так и для скоростного движения. В последнее десятилетие на смену отечественным подвижным составам в эксплуатацию были введены поезда нового поколения типа «Ласточка», разработанные на базе технологических решений немецкой компании Siemens. Со временем их количество на железных дорогах России будет увеличиваться. Также планируется создание подвижного состава нового поколения, для которого предъявляются высокие требования с целью обеспечения надёжности и безопасности движения, облегчения конструкций за счёт использования новых материалов, оптимизации форм и технологий производства. Для достижения поставленных целей необходимо снизить энергоёмкость производства, уменьшить количество металлических отходов, что можно достичь переводом производства деталей на малоотходные процессы, использующие методы обработки металлов давлением. Одними из основных таких деталей являются детали неподрессоренной ходовой части вагонов - вагонные оси.

### 1.1 Современное состояние производства вагонных осей в России и за рубежом

Ось колёсной пары железнодорожного состава является деталью ответственного назначения, принимающей на себя нагрузку от вагона и транспортируемого груза, и передающей эту нагрузку на колёса и, соответственно, на рельсы. К подобным изделиям предъявляются

повышенные требования по работоспособности и надёжности. Одним из основных направлений развития железнодорожного транспорта является повышение осевой нагрузки. Так, в России осевая нагрузка для грузовых поездов в период с 1970-х по 2020-е годы была повышена с 20,5 кН до 23,5 кН, количество инновационных вагонов с осевой нагрузкой 25 кН составило около 16% от всего парка по состоянию на 2021 год, а также проводятся работы по созданию вагонов с нагрузкой 27 кН [1,2].

Вагонные оси являются ступенчатыми стальными изделиями переменного сечения, которые различаются геометрическими размерами в зависимости от воспринимаемых нагрузок, наличием или отсутствием центрального отверстия, химическим составом [3]. Основными конструктивными элементами оси являются шейка оси для крепления подшипников и буксового узла, предподступичная часть, подступичная часть для крепления колёс и средняя часть [4] (рисунок 1).



1-шейка оси, 2-предподступичная часть, 3-подступичная часть, 4- средняя часть

Рисунок 1 – Основные части вагонной оси сплошного сечения типа РУ1Ш  
для пассажирского поезда

Общий объём производства вагонных осей в России проблематично подсчитать по причине отсутствия данных в открытом доступе. Однако, если ориентироваться на объём выпуска подвижного состава и соотношению 4 оси/вагон, то потребность осей для новых вагонов составляет около 230 тыс.

осей/год за период 2015-2020 год с тенденцией к росту (рисунок 2) [5]. Также ежегодно часть парка подвижного состава проходит капитальный ремонт, во время которого производится обточка колёс или их замена на новые по системе «старая ось – новые колёса» (СОНК) [6]. Небольшая часть вагонных осей также требует замены при капитальном ремонте. Их количество составляет около 2,5% от всего объёма колёсных пар, что в годовом выражении составляет в среднем около 5 тыс. осей в год [7,8]. В соответствии с приведённой статистикой, более 90% вагонных осей в РФ используются при формировании колёсных пар грузовых вагонов.

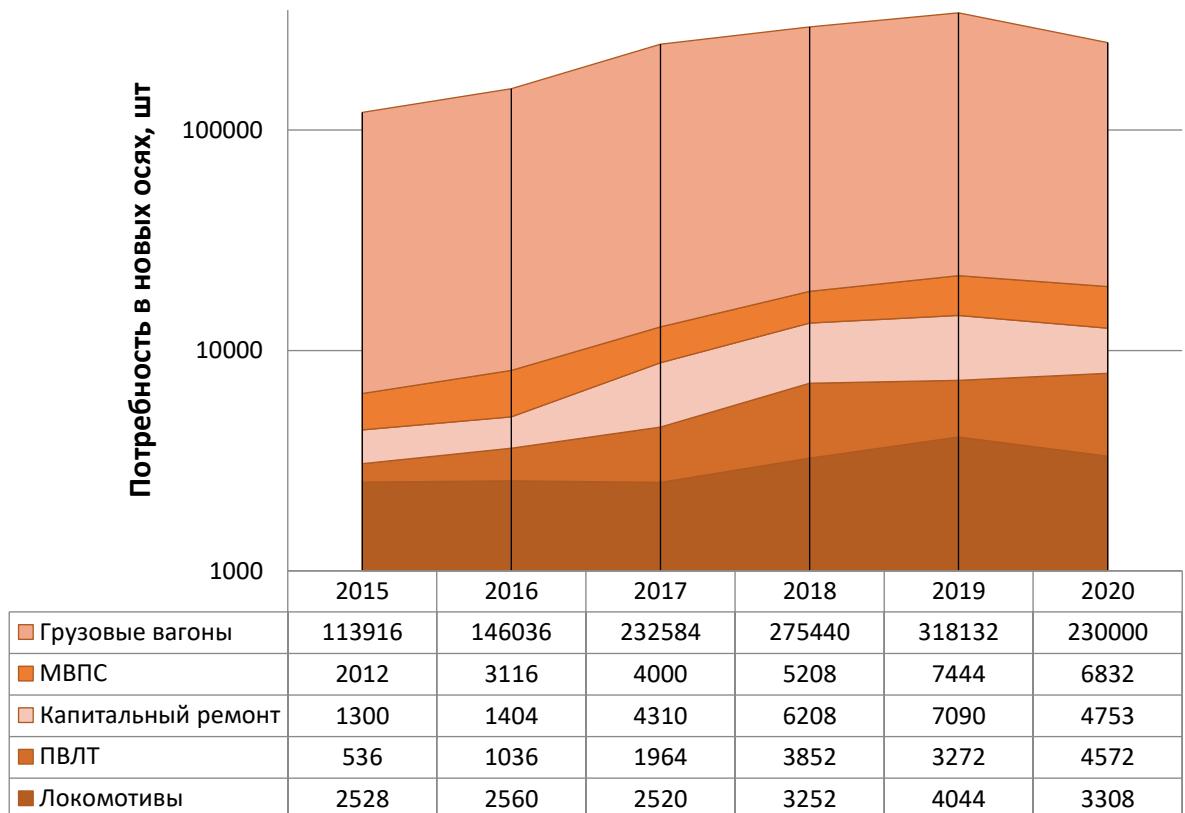


Рисунок 2 – Статистика потребности РФ в новых вагонных осях за 2015-2020 года

Общемировое производство вагонных осей в 2019 году было около 1,1 млн. штук, а доля России составила 21,3% от общего количества.

## 1.2 Технологии производства вагонных осей

Основными способами производства вагонных осей являются различные типы ковки, свободная или радиальная, штамповка [9-11]. Однако предпринимались попытки изготовления и другими методами, в частности – поперечно-винтовой прокаткой [12, 13].

Производство вагонных осей методом свободной ковки является одним из самых первых и используется на ряде производств до настоящего времени [14]. Для его реализации применяется широкий перечень оборудования, в частности – паровоздушные молота [15] (рисунок 3).

Технологический процесс производства вагонных осей свободной ковкой предусматривает следующие операции:

1. Нагрев заготовок из стали ОС до температуры 1100-1170 °C
2. Протяжка одной половины заготовки до диаметра 206 мм
3. Кантовка заготовки на 180°, протяжка второй половины и формирование шейки
4. Повторная кантовка на 180°, протяжка второй шейки оси
5. Охлаждение поковок
6. Нормализация при температуре 850 °C
7. Охлаждение до комнатной температуры
8. Удаление окалины
9. Геометрический и ультразвуковой контроль поковок черновых осей

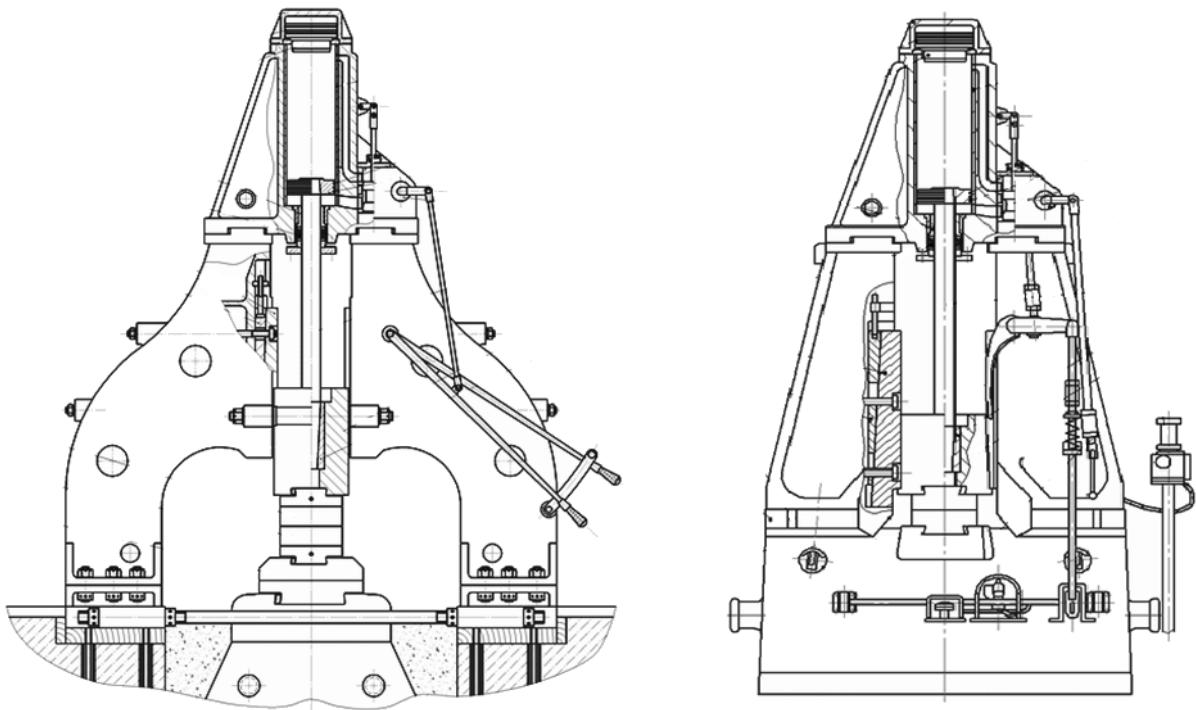


Рисунок 3 - Паровоздушный молот для свободной ковки вагонных осей

Основным преимуществом данного способа является простота и малый объём необходимого оборудования. К недостаткам можно отнести малую производительность (до 9 осей в час), невысокую точность и, следовательно, большой припуск на механическую обработку, малый потенциал автоматизации.

В сравнении со свободной ковкой более технологичным является процесс горячей объёмной штамповки вагонных осей. Технологический процесс штамповки может быть реализован двумя различными способами. Первый способ предусматривает использование заготовки квадратного сечения и штамповку в два перехода – на первом переходе происходит сбивка граней и получение цилиндрической поковки с промежуточными размерами. На втором переходе в чистовом штампе производят обжатие с постоянной кантовкой до получения чистовой поковки.

В соответствии со вторым способом для изготовления чистовой поковки оси используется штамп открытого типа с одним или несколькими ручьями. В

случае использования трёхручьевого штампа (рисунок 4) заготовка квадратного или круглого сечения в первом ручье обжимается по всей длине до диаметра подступичной части. Во втором ручье обжимается центральная часть оси и в третьем – шейка оси. Также возможно формирование в двух ручьях сначала одной половины оси, а после кантовки – второй половины.

Преимущество данных способов, в сравнении со свободной ковкой, в большей производительности и точности получаемых поковок. Однако эта технология требует более массивного и дорогостоящего оборудования, требовательна к качеству исполнения штампов и контролю их износа, требует наличия широкого парка инструмента в случае изготовления осей различных типоразмеров, а также приводит к простою оборудования при изменении производимого типоразмера и заменой инструмента.

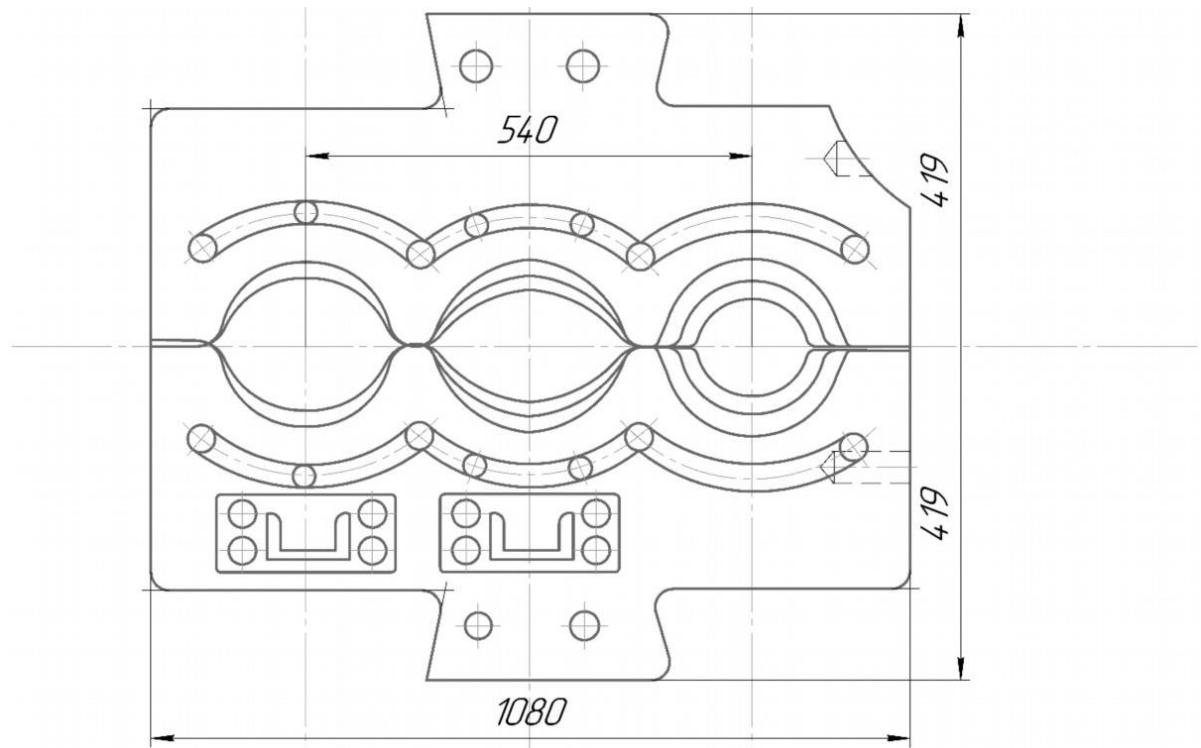
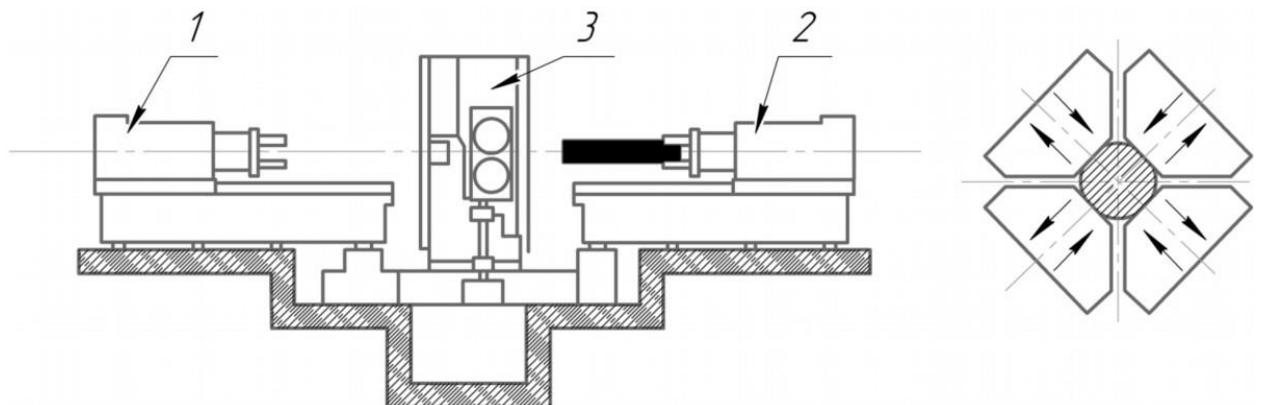


Рисунок 4 - Трёхручевой штамп для ковки оси.

Наиболее технологичным методом производства вагонных осей является радиальная ковка (рисунок 5). Сущность этого метода заключается в многократном обжатии заготовки четырьмя крестообразно расположенными

бойками. За счёт малых единичных деформаций, их большого количества и высокой скорости движения инструмента удается добиться лучшей деформационной проработки исходной структуры металла в сравнении с традиционными способами, сокращения количества нагревов за счёт интенсивного деформационного разогрева, предотвращения существенного уширения металла по сравнению с двухбойковой системой, что формирует благоприятные напряжения сжатия и уменьшает вероятность возникновения трещин в объёме заготовки [16].

Также важными преимуществами является высокая точность получаемых поковок, что уменьшает припуск на механическую обработку и снижает количество металлических отходов. Обеспечивает производительность более 15 черновых осей в час, возможность изготовления широкого сортамента поковок для осей различных конструкций используя один и тот же инструмент и, корректируя исключительно программу ковки, возможность изготовления двойных осей (двух черновых осей, соединённых в области шейки). Возможно также построение производственных линий с высокой степенью автоматизации процессов [17].



1, 2 – манипуляторы, 3 – ковочный блок

Рисунок 5 - Схема радиально-ковочной машины и деформации в ковочных бойках

Данный способ нашёл широкое применение в современной промышленности и в настоящее время является основным для производства вагонных осей как в России, так и за рубежом. В частности, на основе радиальной ковки простроены процессы производства сплошных вагонных осей на Мотовилихинских заводах и Уралвагонзаводе.

В настоящее время Мотовилихинские заводы являются одним из ведущих производителей вагонных осей для железнодорожного транспорта [18]. Технология производства вагонных осей на данном предприятии состоит из следующих технологических операций. После производства блюма сечением 450x540 методом непрерывной разливки и его охлаждения, заготовку подают на участок РКМ. Ковка осуществляется на радиально-ковочной машине SXP-55 (фирмы «GFM» Австрия, рисунок 6).



Рисунок 6 - Ковка вагонной оси на РКМ SXP-55

Заготовки нагревают в кольцевой печи до температуры 1180°C. Нагрев в печи производится в четырёх зонах для достижения равномерной температуры

по всему объёму металла. Нагретая заготовка извлекается из печи и передаётся к одному из манипуляторов, в котором она зажимается для дальнейших операций деформирования. Манипулятор перемещается к ковочному блоку, вводя конец заготовки в зону ковочных бойков, которые совершают движения по заданной программе, обжимая конец вала. При этом манипулятор не только поступательно перемещает заготовку, но и осуществляет её кантовку между ударами [19].

После того, как обжат один конец оси, заготовка передаётся во второй манипулятор сквозь ковочный блок. В момент передачи бойки разводятся и обжатие не производится. После этого бойки обжимают второй конец оси. Обжатая с двух концов ось разгрузочным устройством передаётся на охладительный стол для дальнейшего остывания.

По сравнению со свободной ковкой применение РКМ SXP-55 позволило уменьшить расход металла до 30% при производстве вагонных осей, а также, из-за меньшего припуска на механическую обработку, снизить расход металла при токарных работах на 40-50%.

Как и Мотовилихинские заводы, Уралвагонзавод (УВЗ) является также одним из крупнейших производителей железнодорожных осей в России. На УВЗ эксплуатируется радиально-ковочная машина модели RF-35 фирмы GFM (рисунок 7), которая позволяет охватить практически всю номенклатуру осей, используемую на железнодорожном транспорте. Производительность данного агрегата составляет порядка 200 тысяч осей в год.



Рисунок 7 - Ковка вагонной оси на РКМ RF-35

В настоящее время на УВЗ осевая заготовка получается прокаткой НЛЗ размером 300x360 мм, что приводит к экономии энергетических и материальных ресурсов в сравнении с использованием слитков. С целью улучшения качества получаемого металла применяются методы вакуумной обработки стали. После прокатки полученные заготовки размерами 215x215 мм передаются для дальнейших этапов обработки.

Технология производства вагонных осей состоит из следующих операций - блоком краном подают на загрузочное устройство, которое автоматически передает его на рольганги индуктора. Последний, состоит из 20 индукционных катушек, образующих три зоны нагрева, через которые заготовка перемещается с помощью водоохлаждаемых приводных роликов, расположенных между секциями. Из индуктора нагретая заготовка поступает на поворотный рольганг, где происходит контроль и запись на диаграмме температуры, и далее на рольганг радиально ковочной машины для ковки осей из квадратной или круглой заготовки.

Технологическая схема производства представлена на рисунке 8.

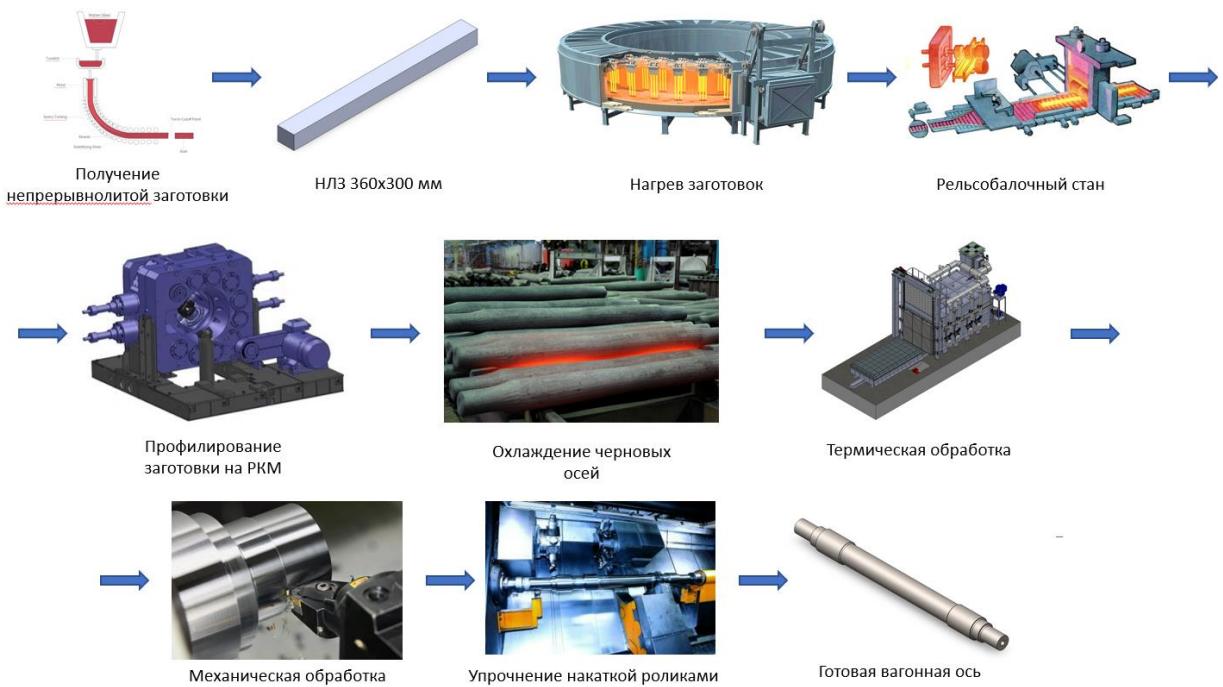


Рисунок 8 – Технологическая схема производства осей на УВЗ

Ось обрабатывается с точностью до  $\pm 1$  мм по диаметральным размерам, а время обработки составляет 2,5—3 мин. Управляет агрегатами машины с пульта оператора. Радиально-ковочная машина обладает достаточно высокой скоростью движения бойков, а также высокой степенью автоматизации.

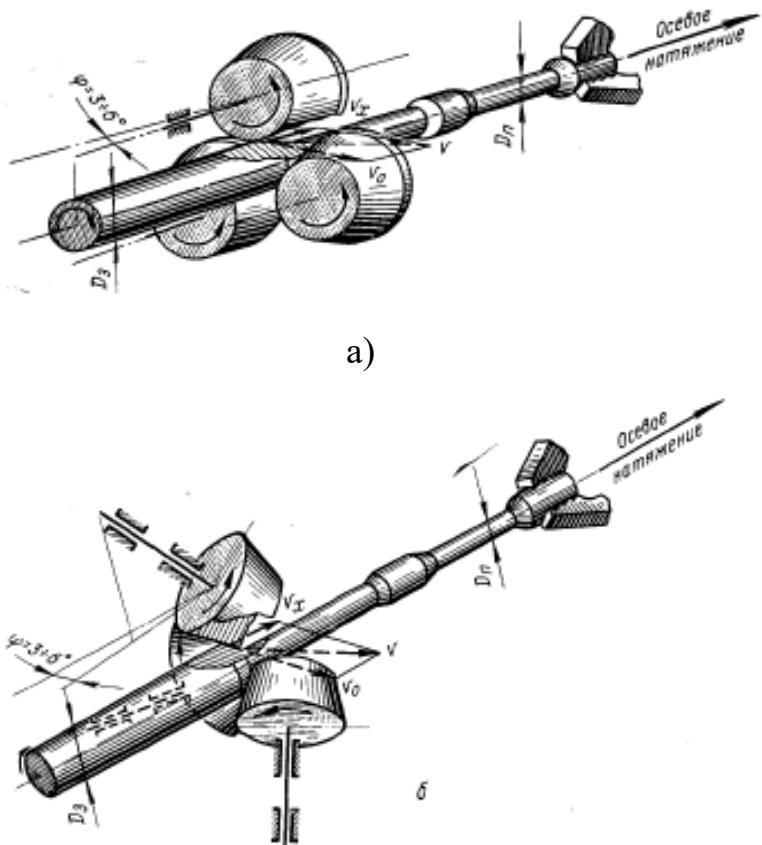
Поскольку заготовку обжимают одновременно с четырех сторон, в очаге деформации создается благоприятная схема течения металла, уменьшающая вероятность возникновения или развития поверхностных дефектов. Ковку на РКМ ведут в условиях стабильного температурного режима. При правильном выборе режима ковки можно полностью компенсировать падение температуры разогревом за счет теплового эффекта пластической деформации [20, 21].

В 2007 г. была предпринята попытка производства осевых заготовок из НЛЗ круглого сечения диаметром 430 мм. В колодцах НЛЗ нагревали до температуры деформации, а затем осуществляли её прокатку до квадратного сечения 240x360 мм в обжимной клети «1150». Дальнейшая технология производства осевых заготовок соответствовала изложенной выше. Исследования показали незначительное наличие осевой ликвации и

пористости в центральной части. Однако такая технология изготовления осевой заготовки из круглых слитков диаметром 430 мм оказалась не экономичной для условий ОАО «НТМК» из-за увеличения числа промежуточных подогревов блюмов, что приводило к потерям годного металла [22].

Перспективным направлением являлось применение винтовой прокатки в трёхвалковом стане для производства осесимметричных изделий, в том числе профильных изделий и сплошных вагонных осей (рисунок 9). Для массового производства в 1975 году на Украине был установлен трёхвалковый осепрокатный стан 250, разработанный и изготовленный ВНИИМетмаш и ЭЗТМ, работающий по данной технологии [23]. Нагретая заготовка зажимается головкой натяжного устройства и протягивается через очаг деформации рабочей клети, в котором обжимается в радиальном направлении рабочими валками, развёрнутыми на угол подачи 3-6°. Во время обжатия валки могут сводиться или разводиться при помощи гидравлической системы исходя из профиля черновой оси, которую требуется получить. Во избежание обрывов во время прокатки заготовка интенсивно охлаждается водой или в случае прокатки сталей, не допускающих резкого местного охлаждения, сжатым воздухом.

Основными преимуществами данной технологии является производительность порядка 1 минуты на ось, высокая степень автоматизации, малые припуски на механическую обработку. Однако у неё есть и ряд недостатков, в частности – отсутствие системы автоматизированного управления и необходимость тщательной настройки гидравлической системы осевого натяжения заготовки [24].



а – дисковые валки; б – конические валки

Рисунок 9 – Схема поперечно-винтовой прокатки периодических профилей

Стан 250 является уникальным агрегатом, изготавливающим вагонные оси методом поперечно-винтовой прокатки. За последние годы в ряде зарубежных публикаций выявлен интерес к данной технологии [25-27].

Ещё одним способом изготовления черновых вагонных осей является поперечно-клиновая прокатка. Её разработчики в качестве положительных моментов выделяют производительность до 120 осей/час, высокую точность, экономию времени на обрезь концевых частей, которая осуществляется одновременно с прокаткой. В качестве варианта исполнения предлагается поперечно-клиновая прокатка с использованием валков или плит, однако для обоих вариантов, как и для штамповки, необходимо наличие индивидуального инструмента для каждого изготавливаемого типоразмера вагонных осей [28-30]. Несмотря на то, что подобная технология применяется для изготовления

различных изделий, в области вагонных осей она пока не нашла промышленной реализации.

Также важным моментом является то, что заявленная производительность агрегатов поперечно-винтовой прокатки и поперечно-клиновой прокатки достигается только в случае использования предварительно деформированной заготовки в качестве исходной. В противном случае необходимо использовать дополнительное оборудование ОМД с целью деформации НЛЗ или слитка и достижения требуемой степени деформации заготовки в соответствии с установленными стандартами, что увеличивает время производства черновых осей в сравнении с заявленной.

### **1.3 Исходные материалы и заготовки, применяемые при производстве вагонных осей**

Физико-механические свойства металла вагонных осей, эксплуатационные свойства определяются на основе химического состава металла, который оговаривается Международной организацией по стандартизации ISO и Международным союзом железных дорог UIC, на базе которых разрабатываются государственные стандарты.

Исходным материалом для производства вагонных осей является качественная углеродистая сталь с содержанием углерода 0,22-0,6% и высоким уровнем ударной вязкости, что обусловлено большим количеством знакопеременных циклических нагрузок, которым подвергаются вагонные оси во время эксплуатации.

Для высокоскоростных поездов в настоящее время используются оси из металла с повышенным содержанием хрома. Увеличение процентного содержания хрома повышает предельную и усталостную прочность металла, снижает вероятность возникновения и активного развития усталостных трещин во время эксплуатации, позволяет повысить скорость передвижения подвижного состава с сохранением уровня безопасности. По причине тяжёлых

режимов торможения, высоких скоростей и увеличения в связи этого термических повреждений, содержание углерода в данных сталях снижают.

В настоящее время основной маркой стали для производства вагонных осей в России является сталь ОС. В таблице 1 представлена информация по химическому составу осевых сталей в различных странах, а в таблице 2 – требования по загрязнённости стали неметаллическими включениями в соответствии с ГОСТ 33200-2014.

Таблица 1 - Химический состав стали, используемой для производства вагонных осей [31, 32]

| Стандарт              | Марка стали | Массовая доля химических элементов, % |         |           |           |       |       |         |     |      |      |
|-----------------------|-------------|---------------------------------------|---------|-----------|-----------|-------|-------|---------|-----|------|------|
|                       |             | C                                     | Mn      | Si        | не более  |       |       |         |     |      |      |
|                       |             |                                       |         |           | V         | S     | P     | Cr      | Ni  | Cu   | Mo   |
| ГОСТ 4728-2010        | ОС          | 0,42-0,5                              | 0,6-0,9 | 0,15-0,35 | -         | 0,035 | 0,035 | 0,3     | 0,3 | 0,25 | -    |
| BS5892<br>(Англия)    | A1          | 0,4                                   | 1,2     | 0,5       | 0,05      | 0,04  | 0,04  | 0,3     | 0,3 | 0,3  | 0,08 |
|                       | A2          | 0,5                                   | 1,2     | 0,5       | 0,05      | 0,04  | 0,04  | 0,3     | 0,3 | 0,3  | 0,08 |
|                       | A3          | 0,4                                   | 1,6     | 0,5       | 0,1       | 0,04  | 0,04  | 0,5     | 0,3 | 0,3  | 0,4  |
|                       | A4          | 0,4                                   | 0,8     | 0,5       | 0,1       | 0,04  | 0,04  | 1,2     | 0,3 | 0,3  | 0,35 |
| AAR M101<br>(США)     | F           | 0,45-0,59                             | 0,6-0,9 | >0,15     | 0,02-0,08 | 0,05  | 0,045 | -       | -   | -    | -    |
|                       | G, H        | -                                     | 0,6-0,9 | >0,15     | 0,02-0,08 | 0,05  | 0,045 | -       | -   | -    | -    |
| EN 13261:2020<br>(EC) | EA1         | <0,4                                  | <1,2    | <0,5      | 0,06      | 0,015 | 0,02  | 0,3     | 0,3 | 0,3  | 0,08 |
|                       | EA4         | 0,22-0,29                             | 0,5-0,8 | 0,15-0,4  | 0,06      | 0,015 | 0,02  | 0,9-1,2 | 0,3 | 0,3  | 0,08 |

Металл для заготовок вагонных осей получают выплавкой в электропечах или при помощи конвертеров. Отливка может проводиться как в

слитки, так и при помощи машин непрерывного литья заготовок. По форме сечения заготовки могут быть как круглые, так и квадратные.

Так как ось испытывает постоянные циклические нагрузки, то стандарты устанавливают определённые требования по загрязнённости неметаллическими включениями, которые могут стать концентраторами напряжений и привести к разрушению оси.

Таблица 2 - Загрязнённость стали неметаллическими включениями [33]

| Тип включений              | Условное обозначение включений | Средний балл, не более, для осей |                              |            |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------|
|                            |                                | A                                | B                            |            |
|                            |                                |                                  | из непрерывнолитых заготовок | из слитков |
| Сульфиды                   | С                              | 1,5                              | 2,5                          | 3,5        |
| Оксиды строчечные          | ОС                             | 1,5                              | 2,5                          | 3,5        |
| Силикаты пластичные        | СП                             | 1,5                              | 2,5                          | 3,5        |
| Силикаты хрупкие           | СХ                             | 1,5                              | 2,5                          | 3,5        |
| Силикаты недеформирующиеся | СН                             | 1,5                              | 2,5                          | 3,5        |

Отмечается важность противофлокенной обработки даже при вакуумировании стали и относительно низком содержании водорода – эти операции позволяют снять внутренние напряжения, которые могут привести к возникновению дефектов как на поверхности вагонной оси, так и в ее центральной части [34].

Отдельным пунктом в стандартах для черновых осей прописывается требуемая степень укова, которая должна составлять не менее 3 для локомотивов и вагонов магистральных железных дорог. При соблюдении

данного требования поперечное сечение полностью прорабатывается, а осевая пористость, при наличии, устраняется [35].

#### **1.4 Совершенствование технологии производства осей для повышения эксплуатационных свойств**

В настоящее время основная доля исследований ведётся в области совершенствования контроля вагонных осей, исследования их усталостной прочности и повреждаемости. Так, опубликовано большое количество исследований, посвящённых вопросам развития усталостных трещин при циклических нагрузках [36-41]. В основном данные исследования проводятся для осей высокоскоростного пассажирского транспорта. Также отдельно рассматривается вопрос коррозионной стойкости подобных осей и скорости развития трещин в агрессивной окружающей среде [42-46].

Повышения эксплуатационных свойств вагонных осей и увеличения их осевой нагрузки можно добиться несколькими основными способами: изменением химического состава стали и повышения предела её прочности, увеличением габаритных размеров и поперечных сечений оси, изменением конструкции и переходом от сплошных осей к полым.

Выплавка качественной стали, обладающей необходимыми свойствами, является одним из важнейших этапов, так как полученные недостатки практически невозможно устранить или компенсировать при выполнении последующих операций [47-49]. Изменение химического состава осевой стали видится нецелесообразным, так как в настоящее время в эксплуатации по оценкам Ространснадзора находится около 82,5 тыс. вагонных осей, изготовленных до 1979 года и, соответственно, спроектированных под осевую нагрузку 20,5-22 тонны, в то время как действующими стандартами установлена осевая нагрузка 23,5 тонны. Малое количество аварий по причине усталостного излома вагонных осей также предполагает рациональность

химического состава стали, однако исследования с данном направлении продолжаются [50].

Предлагается использование композитных осей, значительно более лёгких в сравнении со сплошными. Однако применение подобной конструкции возможно только в небольшом типе подвижных составов по причине расположения подшипников не с наружной стороны оси, а с внутренней, после колёс. Стоимость изготовления и надёжность соединения металлической оболочки и внутренней композитной части также вызывают определённые вопросы [51, 52]. Также в некоторых работах предлагается использование колёсных пар дифференциального исполнения, которые обладают аналогичными недостатками [53].

В качестве альтернативных методов поверхностного упрочнения вместо накатки роликами [54, 55] предлагаются дробеструйная обработка, лазерное упрочнение, индукционная закалка [56-60]. Однако применимо к вагонным осям подобные методы не показывают принципиально лучшего результата в сравнении с классическими и пока не нашли массового применения.

Увеличение размеров поперечных сечений вагонных осей и повышение таким образом грузоподъёмности сейчас является одним из направлений развития железнодорожного транспорта в России. Больших успехов в области изготовления тяжелонагруженных вагонных осей достигли США, где осевая нагрузка с 1925 по 2010 года возросла более чем в два раза, с 16,8 тс до 35,7 тс [61]. Однако в соответствии с рядом исследований повышение осевой нагрузки с 23,5 тс до 27 тс может привести к увеличению частоты повреждения железнодорожного пути до 2-2,5 раз, поэтому данный способ ведёт к высоким капитальным затратам на модернизацию всей железнодорожной транспортной системы [62, 63].

Третьим способом улучшения эксплуатационных качеств вагонных осей является изменение их конструкции и изготовление полых вагонных осей вместо сплошных. Применение полых вагонных осей имеет как очевидные преимущества в виде меньшей массы подвижного состава, экономии металла

при производстве, снижения неподпрессоренной массы, уменьшение энергозатрат на транспортировку порожнего состава, так и ряд неочевидных – лучшее поверхностное упрочнение полых изделий при определённых параметрах поверхностного упрочнения, лучшая сопротивляемость динамическим и ударным нагрузкам.

В настоящее время полые вагонные оси производятся с применением операции глубокого сверления, что существенно увеличивает время производства одной оси, увеличивает количество отходов металла в стружку и уменьшает коэффициент использования материала, а также разрезает продольную макроструктуру металла, сформированную при операциях формирования профиля оси методами ОМД, что приводит к снижению механических свойств металла оси рядом с отверстием. Все перечисленные факторы увеличивают себестоимость полой вагонной оси в сравнении со сплошной. Однако применение подобных осей в подвижном составе локомотивов и высокоскоростных пассажирских поездов оправдывает их высокую себестоимость, так как позволяет проводить ультразвуковой контроль осей в короткие сроки без демонтажа колёсных пар (рисунок 10) [64, 65].

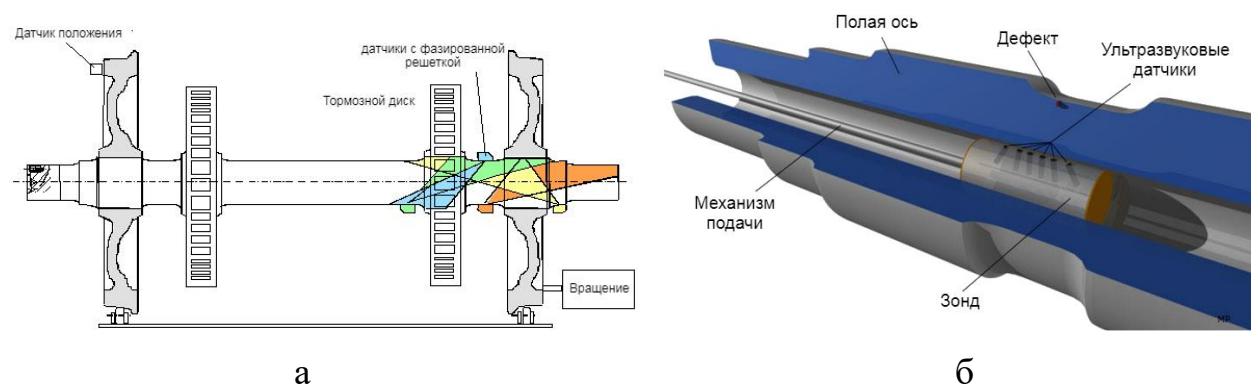


Рисунок 10 – Способы ультразвукового контроля сплошных (а) и полых (б) вагонных осей

Для возможности изготовления и эксплуатации полых вагонных осей на всех видах подвижного состава необходимо исключить или минимизировать использование операции глубокого сверления, а центральное отверстие формировать при помощи других методов на этапе получения заготовки для черновой вагонной оси. Для получения подобных полых заготовок возможно использовать несколько методов [66-68].

Первая группа методов – формирование отверстия на этапе отливки с применением центробежного литья, получение полой заготовки методами непрерывного литья или литья намораживанием. В случае изготовления полой заготовки методом центробежного литья за счёт подачи во вращающуюся изложницу металла открытой струёй неизбежно происходит загрязнение металла окислами, для удаления которых требуется механическая обработка 100% заготовок, а в случае послойного расположения окислов в глубине заготовки их удаление невозможно [69].

Изготовление полых заготовок методами непрерывного литья позволяют получить более качественный и чистый продукт в сравнении с центробежным литьём. Однако проблемы позиционирования дорна для формирования внутреннего отверстия, высокие капитальные затраты, несовершенство технологии в области получения стальных заготовок и ряд других технологических трудностей требуют серьёзных и длительных исследований [70].

Литьё намораживанием позволяет получить полые заготовки с достаточно мелкой зернистостью, исключить окисление металла при подаче расплава из герметичного промежуточного ковша. Однако производительность подобного метода для заготовок вагонных осей в сравнении с традиционными способами сравнительно невелика. Также недостатком, свойственным для всех трёх способов, является необходимость дополнительной проработки металла заготовок методами ОМД с целью дробления литой структуры [71].

Вторая группа методов – формирование отверстия в сплошной заготовке. К данным методам относятся различные типы прошивки – прессовая и винтовая.

Прессовая прошивка осуществляется для заготовок с соотношением высоты к диаметру  $H/D=0,6-0,8$ , однако не требует сложного оборудования [72]. Для получения осевых заготовок с соотношением  $H/D>7,8$  потребуется применение ряда технологических решений в виде использования контейнеров для заготовок и полого прошивания. Полученные заготовки будут обладать высокой разностенностью, центральная часть металла, удалённая при помощи прошивания, уменьшит выход годного, а технологический процесс сопровождается большими паузами при производстве для извлечения полученных заготовок из контейнеров и помещения в них сплошных заготовок под прошивку.

Прошивка осевых заготовок на стане винтовой прокатки является более технологичным способом получения полых осевых заготовок и имеет ряд неоспоримых преимуществ.

1. Применение винтовой прошивки позволяет на одном агрегате получать широкий сортамент осевых заготовок для разных типоразмеров вагонных осей. Это достигается за счёт регулирования параметров очага деформации – расстояния между валками, линейками, а также замены прошивных оправок и стержней

2. При винтовой прошивке интенсивному воздействию подвергается не только наружная часть заготовки, но и центральная, находящаяся в контакте с прошивной оправкой. Подобная проработка позволяет избавиться от осевой пористости и перераспределить равномерно неметаллические включения по внутренней поверхности заготовки, что снижает негативный эффект от их концентрации в осевой зоне. В перспективе подобная проработка осевой зоны может привести к уменьшению требуемой степени укова для черновых вагонных осей [73].

3. При достаточной жёсткости рабочей клети и элементов выходной стороны прошивного стана возможно получение полой осевой заготовки одинарной и двойной длины с точными геометрическими параметрами.

4. При винтовой прокатке формируется спиралевидная структура полой заготовки, которая сохраняется при дальнейшей обработке. Такая структура может положительно сказаться на эксплуатационных свойствах готового изделий в условиях циклических нагрузок, действующих на вагонную ось [74].

Таким образом, наиболее рациональную и универсальную схему для изготовления полых вагонных осей можно предложить следующую:

1. Получение сплошной исходной заготовки круглого или квадратного сечения методами непрерывного литья
2. Предварительная ковка сплошной заготовки на круг
3. Прошивка осевой заготовки на стане винтовой прокатки
4. Профилирование заготовки и получение полой черновой вагонной оси на РКМ
5. Термическая обработка черновых осей
6. Механическая обработка и получение чистовых осей

Исследование и внедрение данной технологии позволит изготавливать конкурентоспособную инновационную продукцию в виде полых вагонных осей широкого сортамента.

Исходя из представленных сведений актуальной целью является разработка технологии производства полых вагонных осей типа РУ1Ш с переменным сечением на основе экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий ряд задач:

1. Провести экспериментальные исследования изготовления осбоголстостенных заготовок методом винтовой прошивки и оценить точность их геометрических параметров.

2. Осуществить исследование выходной стороны существующего промышленного прошивного оборудования методом компьютерного моделирования с целью изучения деформации оправочного стержня при расчётной нагрузке и возможности получения полых осевых заготовок.

3. Провести компьютерное моделирование процесса винтовой прошивки с помощью программного комплекса Qform, исследование влияния угла подачи на напряженно-деформированное состояние заготовки и точностные параметры полых осевых заготовок.

4. Разработать и апробировать технологию получения полых вагонных осей в промышленных условиях.

## **Глава 2. Опытно-промышленные исследования получения особотолстостенных заготовок**

Одним из важных параметров осевых заготовок после прошивки является разностенность. Это связано с тем, что в цепочке дальнейших операций предусмотрено профилирование полой заготовки ковкой на дорне, что требует возможность его введения в полость заготовки [75].

В связи с вышеуказанным необходимо проведение экспериментальных исследований для определения оптимальных параметров технологического процесса прошивки сплошных заготовок и получения особотолстостенных полых заготовок для вагонных осей с требуемой разностенностью.

### **2.1 Методика исследований (характеристика оборудования и условия проведения эксперимента)**

В качестве оборудования для проведения экспериментальной прошивки был выбран опытно-промышленный двухвалковый стан винтовой прошивки МИСиС-130Д. Его техническая характеристика приведена в таблице 3, а внешний вид представлен на рисунке 11

Таблица 3 – Техническая характеристика двухвалкового стана винтовой прокатки МИСиС-130Д

| Наименование параметра              | Значение |
|-------------------------------------|----------|
| 1                                   | 2        |
| Рабочие валки:                      |          |
| диаметр в пережиме, мм              | 430      |
| длина бочки, мм                     | 320      |
| частота вращения, мин <sup>-1</sup> | 57/114   |
| угол раскатки, град                 | 0        |
| угол подачи, град                   | 9...24   |
| Направляющий инструмент             | линейки  |

Продолжение таблицы 3.

| 1                                    | 2                       |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Главный привод:                      |                         |
| тип                                  | Индивидуальный          |
| мощность электродвигателя, кВт       | 2x200                   |
| крутящий момент на одном валке, кН·м | 25                      |
| Тип выходной стороны                 | С боковой выдачей гильз |
| Осьное усилие на оправку, кН         | до 300                  |
| Заготовка:                           |                         |
| диаметр, мм                          | 30...120                |
| длина, мм                            | 80...800                |



Рисунок 11 - Внешний вид рабочей клети стана МИСиС-130Д

Основными факторами, оказывающими влияние на точность полых заготовок, были выбраны коэффициент вытяжки  $\mu$  и угол подачи  $\beta$ .

Коэффициент вытяжки  $\mu$  влияет на точность получаемых полых заготовок по причине изменения параметров формоизменения заготовки в очаге деформации.

Угол подачи  $\beta$  влияет на точность в связи с изменением длины очага деформации и, соответственно, устойчивости заготовки при прошивке, изменении усилий на оправку и оправочный стержень.

Коэффициент вытяжки  $\mu$  принимали равным 1.24, 1.33 и 1.4, угол подачи  $\beta$  -  $10^\circ$ ,  $13^\circ$  и  $16^\circ$ . Таким образом, получено 9 вариантов комбинаций факторов. По каждому из вариантов осуществлена прошивка 3 заготовок.

Перед экспериментальными исследованиями были рассчитаны энергосиловые параметры при прошивке и проведена оценка устойчивости стержней.

Ключевым параметром прошивки для оценки устойчивости прошивного стержня является усилие, действующее на валок [76].

Усилие  $P$ , действующее на валок, вычисляется как:

$$P = p_{cp} \cdot F, \quad (1)$$

где  $p_{cp}$  – среднее нормальное контактное напряжение;

$F$  - площадь контактной поверхности металла с валком.

Для определения среднего нормального напряжения по дуге контакта в конусе прошивки используется формула [77]:

$$p_{cp} = (1,8 - \frac{b_{\pi}}{2r_{\pi}})(1 - 2,7\delta_{\pi}^2)\sigma_{s cp} \quad (2)$$

где  $\delta_{\pi}$  – относительное обжатие заготовки в пережиме,

$b_{\pi}/2r_{\pi}$  определяется для пережима, а?

$\sigma_{s cp}$  – для среднего сечения очага деформации в конусе прошивки.

Осьное усилие на оправку  $Q$  рекомендуется оценивать произведением усилия на валок  $P$  на коэффициент  $k$  [78-80]. Однако в большинстве источников при расчёте осевого усилия не учитывается параметр угла подачи

валков, который существенно влияет на возникающие усилия. Так, экспериментально было показано, что в зависимости от настройки очага деформации коэффициент  $k$  может изменяться в пределах 0,25-0,6 [81]. Основываясь на представленных экспериментальных данных, для угла подачи  $10^\circ$  коэффициент  $k$  выбран равным 0,3,  $13^\circ - 0,35$  и  $16^\circ - 0,4$ .

Рассчитанные осевые усилия на стержень с зависимости от коэффициента вытяжки и угла подачи представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Усилия на оправочный стержень при прошивке

| Угол подачи $\beta, {}^\circ$ | Коэффициент вытяжки |          |          |
|-------------------------------|---------------------|----------|----------|
|                               | 1,24                | 1,33     | 1,4      |
| 10                            | 39,96 кН            | 43,38 кН | 51,13 кН |
| 13                            | 46,62 кН            | 50,6 кН  | 59,65 кН |
| 16                            | 53,28 кН            | 57,84 кН | 68,17 кН |

В дальнейших расчётах будут использованы значения усилий на оправочный стержень при угле подачи  $\beta = 16^\circ$ , как имеющие максимальные значения.

Оправочный стержень деформируется под нагрузкой в процессе прошивки. Эта деформация может быть устойчивой, при которой стержень возвращается в прямолинейное состояние после снятия нагрузки, и неустойчивой, когда возвращения в исходное состояние не происходит.

Максимальное значение осевого усилия на оправочный стержень, при котором деформированное состояние остаётся устойчивым, называется критической силой и обозначается  $F_k$ . При превышении данного значения происходит потеря устойчивости стержня и возможно его разрушение.

Для определения критического напряжения необходимо знать площадь поперечного сечения оправочного стержня и критическую силу:

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A} \quad (5)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения оправочного стержня.

Формула Эйлера для вычисления критической силы используется в том случае, если потеря устойчивости происходит при упругом деформировании, а для этого необходимо, чтобы предел пропорциональности  $\sigma_{пц}$  был выше, чем критическое напряжение:

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\mu \cdot l)^2} \quad (6)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;

$I$  – момент инерции,  $\text{мм}^4$ ;

$\mu$  – коэффициент приведения длины стержня, зависящий от способов закрепления концов стержня;

$l$  – геометрическая длина стержня.

Для вычисления гибкости стержня  $\lambda$  в случае его сжатия, применяется следующая формула:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i} \quad (7)$$

где  $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$  – радиус инерции поперечного сечения стержня,  $\text{мм}$ ;

$A$  – площадь поперечного сечения стержня,  $\text{мм}^2$ .

Если выполняется следующее условие, то для дальнейших расчётов применима формула Эйлера:

$$\lambda \geq \lambda_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{\text{пц}}}} \quad (8)$$

Результаты проведённого расчёта представлены в таблице 5.

Из расчётов видно, что расчетная сила, действующая на оправочный стержень, значительно превышает значения критическое силы. С целью увеличения критической силы и, соответственно, сечения стержня, были изготовлены дополнительные втулки с внешним диаметром 85 мм и внутренним, равным диаметру оправочного стержня. Данные втулки перед процессом прошивки помещаются на оправочный стержень и устанавливаются в центрователь вплотную к рабочим валкам. За счёт их применения увеличивалась жёсткость системы заготовка-оправка-стержень, а во время прошивки при контакте переднего торца и заготовки, втулка свободно перемещалась в осевом направлении, не препятствуя процессу прошивки [82].

С учётом изготовленных и применённых втулок результаты расчёта приведены в таблице 6.

По результатам расчётов силы, действующие на оправочный стержень, не превышают значений расчётной критической силы. Соответственно, процесс прошивки должен протекать устойчиво без существенной деформации и разрушения оправочного стержня.

Таблица 5 - Результаты расчета оправочных стержней на устойчивость

| Параметр                         | Материал стержня | Предел пропорциональности, МПа | Модуль упругости стержня, МПа | Коэффициент приведения длины стержня | Геометрическая длина, мм | Диаметр стержня, мм | Площадь поперечного сечения стержня, мм <sup>2</sup> | Радиус инерции стержня, мм | Момент инерции, мм <sup>4</sup> | Гибкость стержня | Гибкость | Критическая сила, кН |
|----------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------|--|----------------------------|---------------------------------|------------------|----------|----------------------|
| Стержень оправки диаметром 26 мм |                  |                                |                               |                                      |                          | 24                  | 197,8  | 7,5                        | 11127                           | 233,3            | 51,36    | 7,52                 |
| Стержень оправки диаметром 34 мм | Сталь 40Х        | 790                            | 214000                        | 0,75                                 | 2600                     | 32                  | 549,5  | 9,18                       | 46295                           | 190,6            | 51,36    | 31,3                 |
| Стержень оправки диаметром 38 мм |                  |                                |                               |                                      |                          | 36                  | 401,9  | 11,4                       | 52249                           | 153,4            | 51,36    | 35,33                |

Таблица 6 - Результаты расчета оправочных стержней на устойчивость с учётом втулок

| Параметр                         | Материал стержня | Предел пропорциональности, МПа | Модуль упругости стержня, МПа | Коэффициент приведения длины стержня | Геометрическая длина, мм | Диаметр стержня d, мм | Площадь поперечного сечения стержня, $\text{мм}^2$ | Радиус инерции стержня, мм | Момент инерции, $\text{мм}^4$ | Гибкость стержня | Гибкость | Критическая сила, кН |
|----------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------|--|----------------------------|-------------------------------|------------------|----------|----------------------|
| Стержень оправки диаметром 26 мм |                  |                                |                               |                                      |                          |                       |  |                            |                               |                  |          |                      |
| Стержень оправки диаметром 34 мм | Сталь 40Х        | 790                            | 214000                        | 0,75                                 | 2600                     | 85                    | 5417   | 21,7                       | 2555942                       | 80,57            | 51,36    | 1728                 |
| Стержень оправки диаметром 38 мм |                  |                                |                               |                                      |                          | 85                    | 5056   | 22,3                       | 2530936                       | 78,22            | 51,36    | 1711                 |

После оценки устойчивости оправочных стержней была проведена экспериментальная прошивка особотолстстенных заготовок. В качестве исходного материала использовалась горячекатаная заготовка диаметром 90 мм, полученная из оси РУ1 после её перекатывания на стане РСП. Предварительно исходную ось делили на три части, нагревали до температуры 1180 °С и прокатывали на стане МИСиС-130Т до диаметра 90 мм. Полученный пруток разрезали на заготовки длиной 270 мм. На переднем торце заготовок выполняли зацентровочное углубление с целью повышения стабильности процесса прошивки и уменьшения параметра разностенности полученных особотолстостенных заготовок.

Перед прошивкой сплошные заготовки нагревали в печи до температуры 1150-1180 °С. Транспортировка заготовок от печи до входной стороны прошивного стана занимала 3-6 с, что приводило к падению температуры поверхности заготовок на 30-40 °С.

Калибровка рабочих валков представлена на рисунке 12. Валки изготовлены из стали 45, рабочая поверхность обладает твёрдостью приблизительно НВ 200.

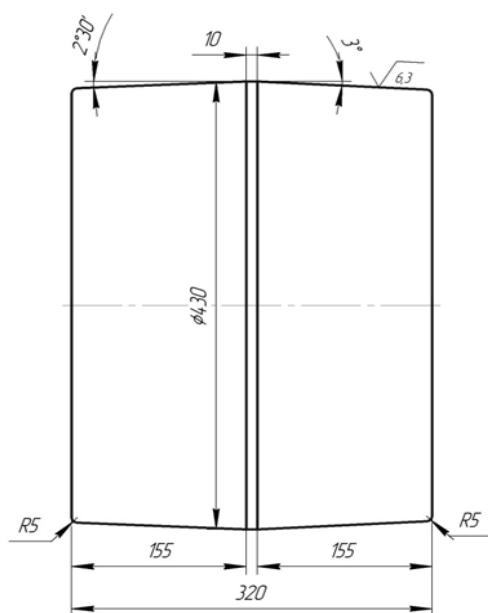


Рисунок 12 – Бочка валка прошивного стана МИСиС-130Д

Направляющим инструментом служат линейки, изготовленные из легированного сплава, обладающие твёрдостью поверхности приблизительно HRC 57.

Для прошивки заготовок были выбраны оправки трёх типов - диаметром 26 мм и длиной 73 мм, диаметром 34 мм и длиной 78 мм, диаметром 38 мм и длиной 105 мм (рисунок 13). Крепления оправок в оправочном стержне выполнено по конической посадке.

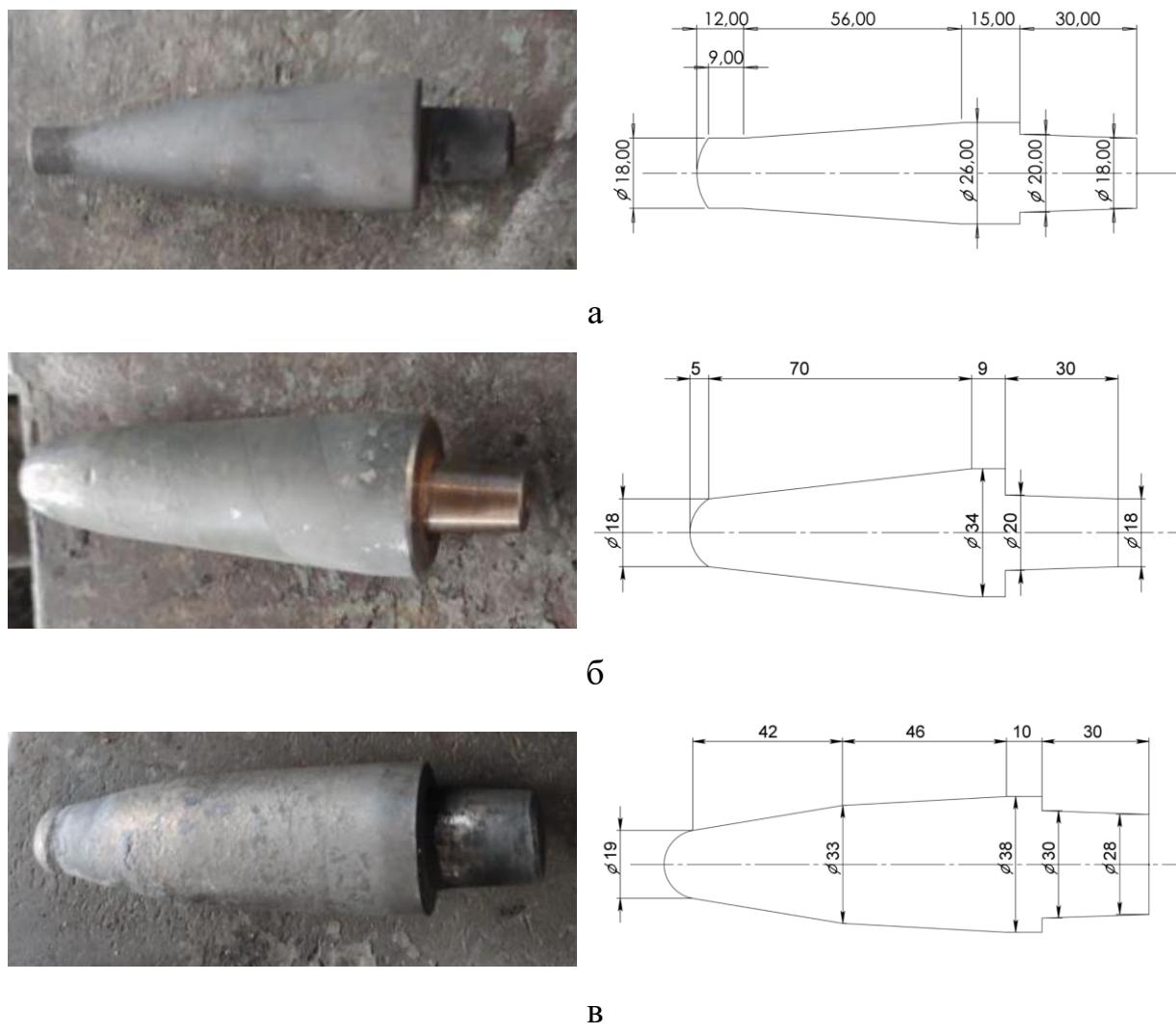


Рисунок 13 – Оправки трёх типоразмеров, использованные для экспериментальной прошивки

Параметры настройки очага прошивного стана представлена в таблице 7.

Таблица 7 - Настройка очага прошивного стана

| Параметр   | Значение |
|--|----------|
| Расстояние между валками в пережиме В, мм                  | 79       |
| Расстояние между линейками Л, мм                           | 90,2     |
| Выдвижение оправки за пережим, мм                          | 45       |
| Коэффициент овализации $\xi$                               | 1,142    |
| обжатие заготовки в пережиме $\varepsilon_p$ , %           | 14       |
| обжатие заготовки перед носком оправки $\varepsilon_h$ , % | 8,9      |
| Угол подачи $\beta$ , °                                    | 10-16°   |

Процесс прошивки протекал стабильно, время прошивки составило 1,5-2 с. Всего прокатано 27 заготовок, по три для каждого типоразмера. В паузах между прошивками заготовок рабочие валки и прошивные оправки охлаждались водой.

При исследовании полученных заготовок особое внимание уделялось параметру разностенности, который влияет на возможность введения дорна при операции профилирования на РКМ.

После прокатки гильзы разрезали на 6 частей для возможности точного измерения толщины стенки по всей длине заготовки по схеме, представленной на рисунке 14. Измерение геометрических параметров производилось при помощи электронного штангенциркуля с точностью 0,01 мм.

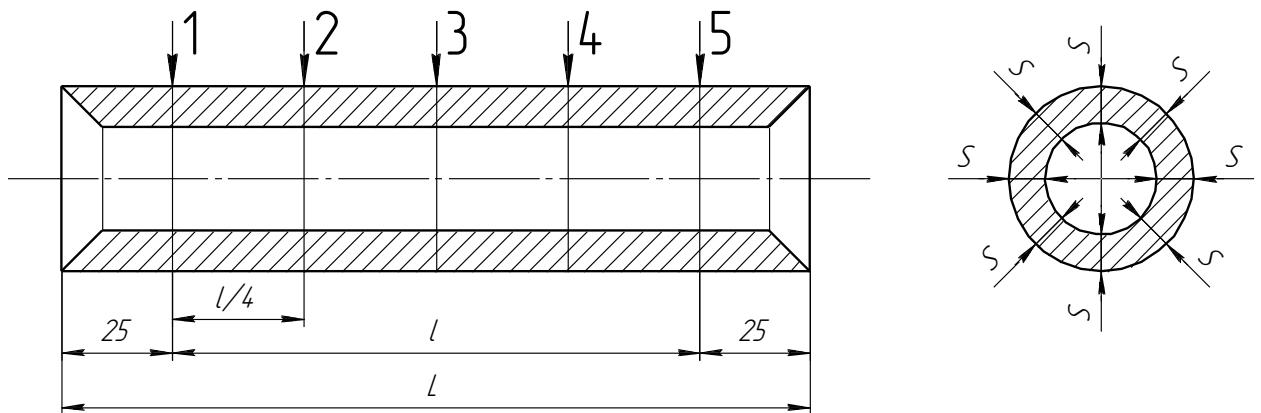


Рисунок 14 - Схема измерения геометрических параметров гильз.

Для определения разностенности гильзы в контролируемых сечениях вычисляли разность между минимальным и максимальным значениями параметра толщины стенки.

Внешний вид гильз после прошивки и с нанесённой маркировкой перед порезкой представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 - Внешний вид гильз после прошивки.

## 2.2 Анализ экспериментальных данных

Геометрические параметры трёх прошитых полых заготовок при угле подачи  $13^\circ$  представлены в таблицах 8-10.

Таблица 8 - Геометрические параметры прошитых полых заготовок на оправке диаметром 26 мм при угле подачи  $\beta=13^\circ$

| №<br>заг/<br>№ сеч            | Геометрические параметры полученных заготовок, мм |       |       |       |       |       |       |       |               |                 |                |               |                 |                |     |
|-------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|-----|
|                               | Толщина стенки                                    |       |       |       |       |       |       |       | $S_{cp}$ , мм | $\Delta S$ , мм | $\Delta S, \%$ | $D_{cp}$ , мм | $\Delta D$ , мм | $\Delta D, \%$ | L   |
|                               | $S_1$   | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$ | $S_6$ | $S_7$ | $S_8$ |               |                 |                |               |                 |                |     |
| $\beta=10^\circ$ , допр=26 мм |   |       |       |       |       |       |       |       |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/1                           | 27,64   | 27,51 | 27,11 | 27,09 | 27,88 | 27,97 | 28,43 | 28,21 | 27,67         | 2,14            | 7,73           | 83,59         | 1,16            | 1,39           | 338 |
| 1/2                           | 27,47   | 27,28 | 26,97 | 27,28 | 27,63 | 27,81 | 28,41 | 27,6  |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/3                           | 27,08   | 26,94 | 26,84 | 27,75 | 28,25 | 28,68 | 28,96 | 28,07 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/4                           | 27,03   | 26,82 | 27,15 | 27,6  | 27,96 | 28,13 | 28,32 | 28    |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/5                           | 26,94   | 26,92 | 26,87 | 27,85 | 28,37 | 28,45 | 28,08 | 27,39 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/1                           | 28,88   | 28,51 | 27    | 26,37 | 26,49 | 27,24 | 28,4  | 29,28 | 27,59         | 3,21            | 11,64          | 83,71         | 1,2             | 1,43           | 329 |
| 2/2                           | 29,18   | 27,82 | 26,81 | 26,07 | 26,34 | 27,16 | 28,68 | 28,81 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/3                           | 27,88   | 27,84 | 27,25 | 26,6  | 26,76 | 27,17 | 27,88 | 28,24 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/4                           | 28,29   | 27,73 | 26,96 | 26,46 | 26,45 | 26,87 | 28    | 28,6  |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/5                           | 28,65   | 27,98 | 27,28 | 26,57 | 26,84 | 27,25 | 28,25 | 28,65 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/1                           | 27,91   | 28,7  | 28,13 | 27,71 | 27,24 | 27,48 | 27,24 | 27,42 | 27,69         | 2,44            | 8,81           | 83,58         | 1,05            | 1,26           | 342 |
| 3/2                           | 27,75   | 28,55 | 28,41 | 27,72 | 27,26 | 26,59 | 26,69 | 27,45 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/3                           | 27,48   | 28,57 | 28,98 | 28,45 | 27,85 | 27,37 | 27,14 | 26,98 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/4                           | 27,78   | 28,8  | 28,44 | 28,08 | 27,33 | 26,72 | 26,76 | 27    |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/5                           | 27,81   | 27,93 | 28,64 | 28,42 | 27,67 | 26,54 | 27,03 | 27,61 |               |                 |                |               |                 |                |     |

Таблица 9 - Геометрические параметры прошитых полых заготовок на оправке диаметром 34 мм при угле подачи  $\beta=13^\circ$

| №<br>заг/<br>№ сеч            | Геометрические параметры полученных заготовок, мм |       |       |       |       |       |       |       |               |                 |                |               |                 |                |     |
|-------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|-----|
|                               | Толщина стенки                                    |       |       |       |       |       |       |       | $S_{cp}$ , мм | $\Delta S$ , мм | $\Delta S, \%$ | $D_{cp}$ , мм | $\Delta D$ , мм | $\Delta D, \%$ | L   |
|                               | $S_1$   | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$ | $S_6$ | $S_7$ | $S_8$ |               |                 |                |               |                 |                |     |
| $\beta=10^\circ$ , допр=26 мм |   |       |       |       |       |       |       |       |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/1                           | 23,51   | 24,1  | 24,25 | 24,56 | 23,7  | 23,8  | 23,61 | 23,43 | 23,98         | 1,52            | 6,34           | 85,20         | 0,92            | 1,08           | 345 |
| 1/2                           | 23,59   | 24,09 | 23,92 | 24,44 | 24,34 | 23,7  | 23,47 | 23,34 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/3                           | 24,05   | 24,63 | 24,46 | 23,87 | 24,55 | 23,84 | 23,46 | 23,28 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/4                           | 23,7  | 24,3  | 24,58 | 24,4  | 24,01 | 23,93 | 23,8  | 23,44 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/5                           | 24,8  | 24,63 | 23,69 | 24,18 | 24,54 | 23,7  | 23,54 | 23,97 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/1                           | 24,27   | 23,93 | 23,58 | 24,04 | 24,14 | 24,15 | 24,07 | 24,38 | 23,99         | 2,06            | 8,59           | 85,38         | 0,99            | 1,16           | 358 |
| 2/2                           | 24,2  | 24,13 | 23,96 | 23,73 | 23,59 | 23,83 | 23,84 | 24,24 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/3                           | 23,88   | 23,32 | 22,88 | 24,03 | 24,94 | 24,87 | 24,56 | 24,23 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/4                           | 23,56   | 23,24 | 23,5  | 23,68 | 23,81 | 24,1  | 24,49 | 24,22 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/5                           | 23,71   | 23,84 | 23,88 | 23,92 | 23,89 | 24,22 | 24,43 | 24,44 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/1                           | 23,96   | 23,69 | 23,45 | 23,81 | 24,38 | 24,02 | 24,09 | 24,07 | 23,96         | 2,1             | 8,77           | 85,29         | 0,97            | 1,14           | 342 |
| 3/2                           | 23,53   | 23,75 | 23,32 | 23,28 | 24,64 | 24,47 | 23,94 | 23,31 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/3                           | 23,48   | 23,76 | 24,39 | 24,82 | 24,68 | 24,66 | 23,97 | 23,41 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/4                           | 23,47   | 23,51 | 24,39 | 24,72 | 24,62 | 23,69 | 23,35 | 23,31 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/5                           | 23,76   | 24,89 | 25,23 | 24,69 | 23,83 | 23,59 | 23,22 | 23,13 |               |                 |                |               |                 |                |     |

Таблица 10 - Геометрические параметры прошитых полых заготовок на оправке диаметром 38 мм при угле подачи  $\beta=13^\circ$

| №<br>заг/<br>№ сеч            | Геометрические параметры полученных заготовок, мм |       |       |       |       |       |       |       |               |                 |                |               |                 |                |     |
|-------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|----------------|-----|
|                               | Толщина стенки                                    |       |       |       |       |       |       |       | $S_{cp}$ , мм | $\Delta S$ , мм | $\Delta S, \%$ | $D_{cp}$ , мм | $\Delta D$ , мм | $\Delta D, \%$ | L   |
|                               | $S_1$   | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$ | $S_6$ | $S_7$ | $S_8$ |               |                 |                |               |                 |                |     |
| $\beta=10^\circ$ , допр=26 мм |   |       |       |       |       |       |       |       |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/1                           | 22,07   | 22,35 | 23,11 | 23,44 | 23,58 | 23,17 | 22,82 | 21,91 | 22,79         | 2,34            | 10,27          | 84,92         | 0,58            | 0,68           | 362 |
| 1/2                           | 21,95   | 22,64 | 23,08 | 23,78 | 23,24 | 23,11 | 22,4  | 22,06 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/3                           | 21,52   | 22,16 | 22,97 | 23,34 | 23,27 | 23,25 | 22,67 | 22    |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/4                           | 21,78   | 22,09 | 23,04 | 23,19 | 23,86 | 23,25 | 22,76 | 22,13 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 1/5                           | 22,55   | 22,66 | 22,96 | 23,42 | 23,71 | 23,33 | 22,64 | 22,15 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/1                           | 23,27   | 23,18 | 22,64 | 22,45 | 22,11 | 21,77 | 22,35 | 23,1  | 22,75         | 1,82            | 8,00           | 84,99         | 0,75            | 0,88           | 370 |
| 2/2                           | 23,37   | 22,99 | 22,54 | 22,11 | 21,82 | 22,21 | 23    | 23,13 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/3                           | 23,18   | 23,16 | 22,52 | 22,2  | 22,21 | 22,92 | 23,19 | 23,34 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/4                           | 22,95   | 23,02 | 22,18 | 22,2  | 22,51 | 22,93 | 22,95 | 23,09 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 2/5                           | 23,59   | 23,13 | 22,67 | 22,03 | 22,28 | 22,73 | 23,22 | 23,58 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/1                           | 22,64   | 22,39 | 22,33 | 22,4  | 22,64 | 23,23 | 23,54 | 22,96 | 22,81         | 1,98            | 8,68           | 84,97         | 0,76            | 0,89           | 358 |
| 3/2                           | 22,72   | 22,61 | 22,51 | 22,35 | 22,48 | 22,75 | 23,05 | 23,29 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/3                           | 23,41   | 22,84 | 22,2  | 22,19 | 22,79 | 22,95 | 23,3  | 23,85 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/4                           | 23,08   | 22,79 | 22,32 | 21,87 | 22,2  | 22,83 | 23,38 | 23,43 |               |                 |                |               |                 |                |     |
| 3/5                           | 22,89   | 22,49 | 22,37 | 22,04 | 22,89 | 23,2  | 23,85 | 23,35 |               |                 |                |               |                 |                |     |

Было выявлено, что при увеличении угла подачи также увеличивается и разностенность. Также отмечено, что при прошивке на углах подачи  $13^\circ$  и  $16^\circ$  значение разностенности увеличивалось от передней части заготовки к задней, и что при угле подачи  $\beta = 10^\circ$  разностенность заготовки остаётся примерно на одном уровне по длине заготовки, а на задней части снижается. Это можно объяснить влиянием эффекта самоцентрирования оправки, который наблюдается при меньших усилиях, действующих на оправочный стержень. На рисунке 16 показано изменение разностенности по сечениям в зависимости от угла подачи, а на рисунке 17 представлена зависимость разностенности от угла подачи и коэффициента вытяжки.

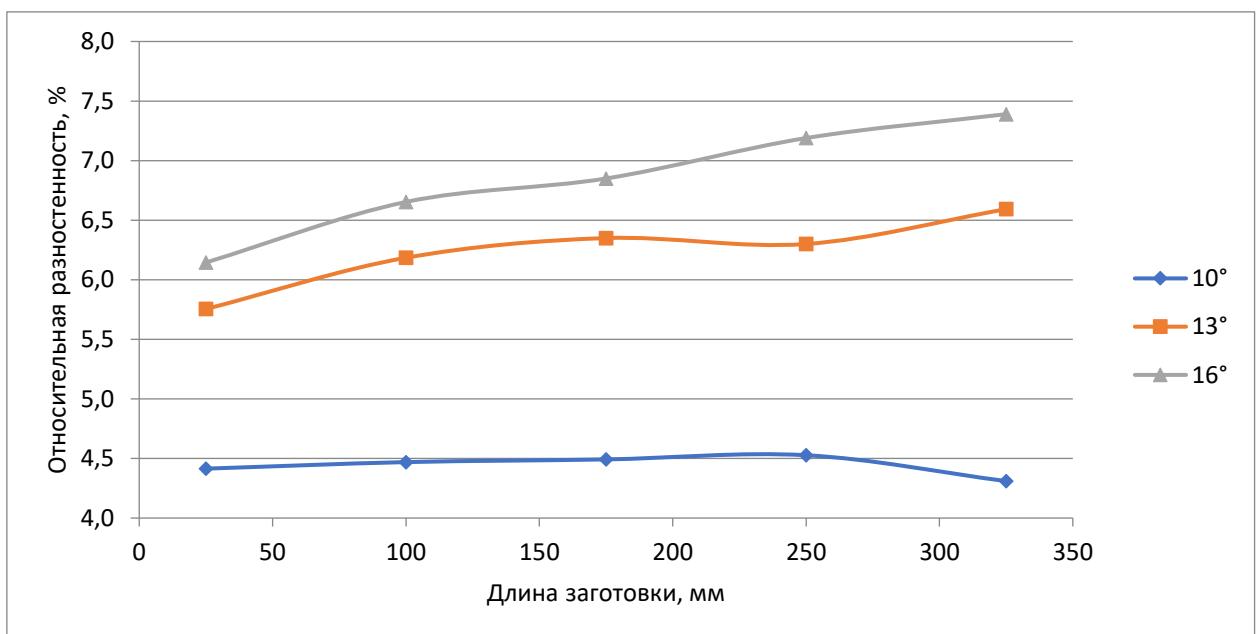


Рисунок 16 - Изменение разностенности по сечениям от угла подачи валков

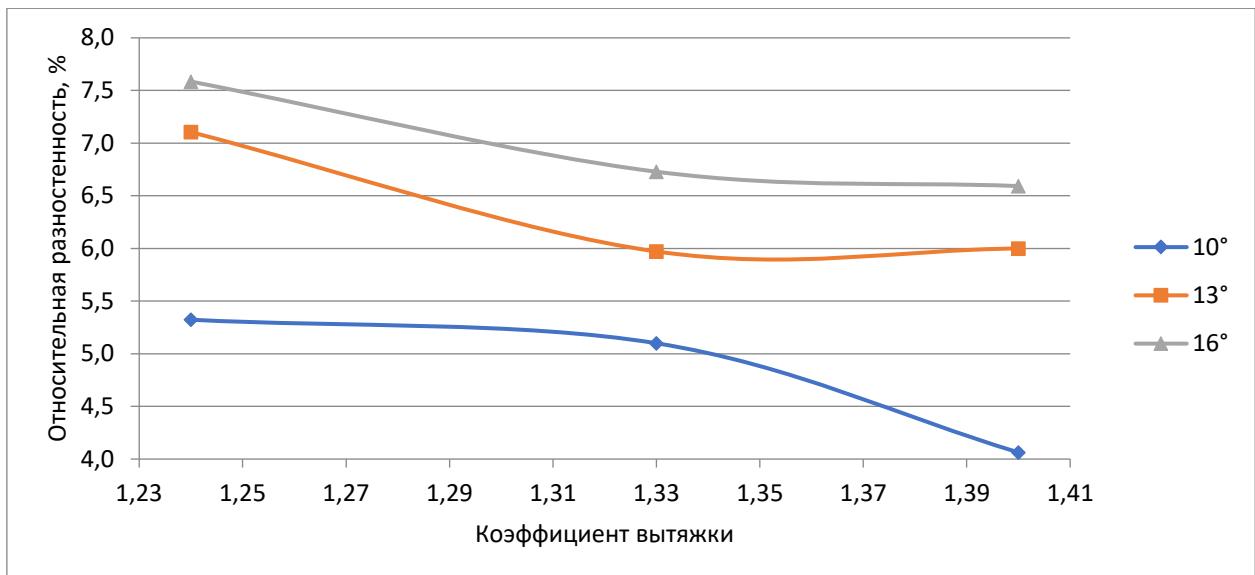


Рисунок 17 - Зависимость разностенности от угла подачи и коэффициента вытяжки

Подобное изменение разностенности в зависимости от изменяемых параметров можно объяснить тем, что при увеличении угла подачи растут усилия на оправочный стержень, что приводит увеличению его изгиба в процессе прошивки. Это подтверждается результатами расчёта усилий, действующих на оправочный стержень, представленных в таблице 6. При увеличении коэффициента вытяжки за счёт увеличения диаметра прошивной оправки увеличивается и диаметр оправочного стержня. Соответственно, стойкость консольной части, которая не удерживается втулкой, также повышается. Это также может приводить к уменьшению разностенности .

## Глава 3. Исследование деформации оправочного стержня, а также напряжённо-деформированного состояния заготовки при прошивке средствами компьютерного моделирования

### 3.1 Изучение деформации оправочного стержня

Важной частью работы является оценка возможности получения точных особотолстостенных заготовок на промышленном агрегате ТПА 70-270 АО ВМЗ при существующей конструкции выходной стороны с учётом расположения центрователей. Для этого на основе чертежей оборудования были созданы модели трёхроликовых центрователей и создана сборка из стержня и трёх центрователей (рисунок 18).

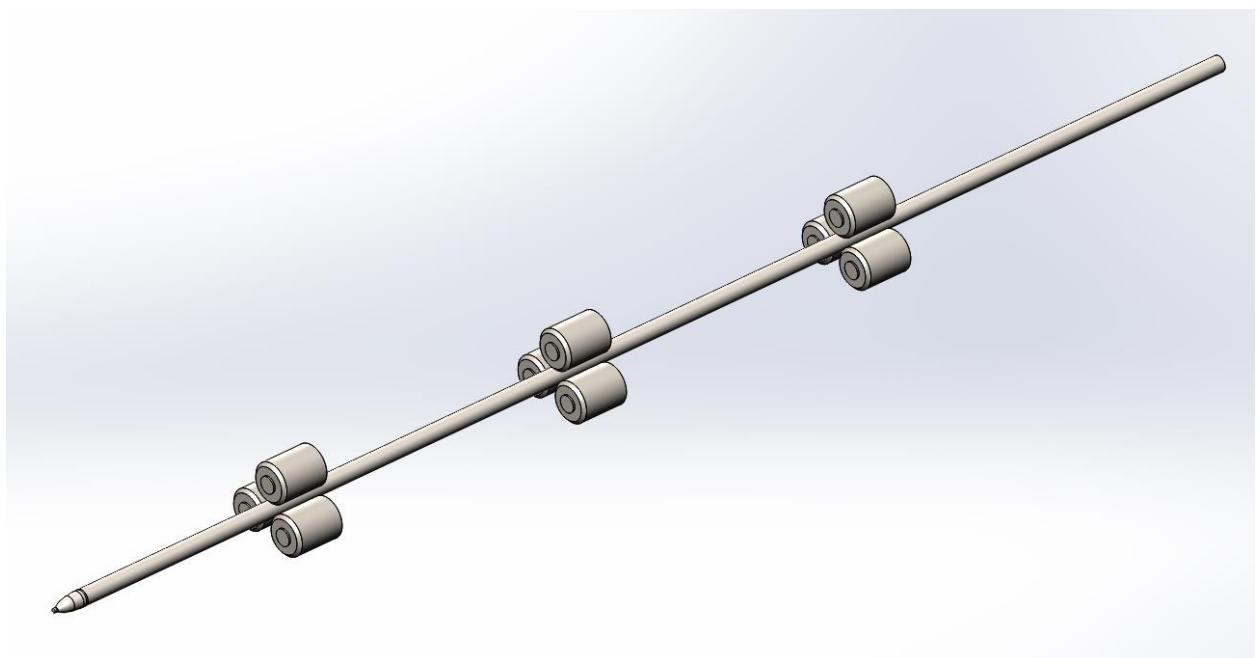


Рисунок 18 - Сборка для оценки прочности и устойчивости оправочного стержня.

В соответствии с методикой, изложенной во второй главе, были рассчитаны усилия, действующие на оправку, которые составили 458 кН. При помощи модуля Solidworks Simulation определены условия закрепления

стержня и роликов, приложены усилия к оправке и сила тяжести. Визуализация условий закреплений и действующих сил представлена на рисунке 19.

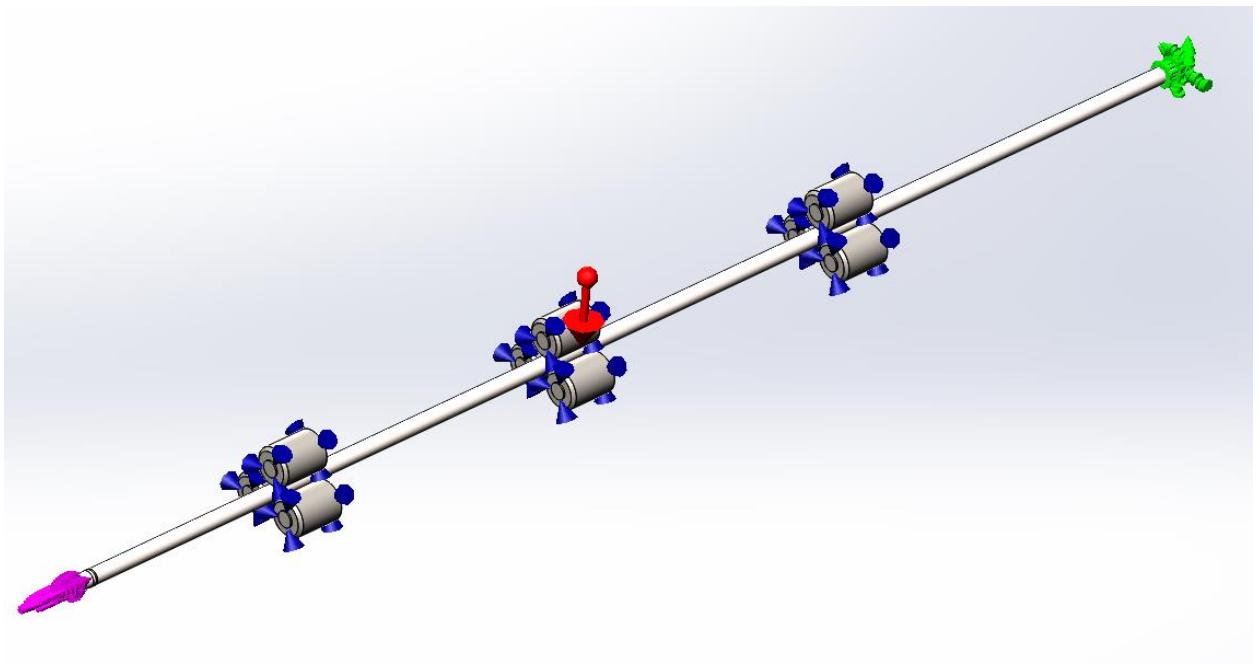


Рисунок 19 - Условия закрепления сборки и действующий силы

На основе созданной модели были построены графики отклонения оправочного стержня от оси прокатки. Для этого по длине стержня на расстоянии 400 мм друг от друга были поставлены точки. Для каждой из этих точек определены отклонения относительно осей OY и OZ, а затем по теореме Пифагора вычислены отклонения этих точек в плоскости, перпендикулярной оси прокатки и построен график этого отклонения, представленный на рисунке 20.

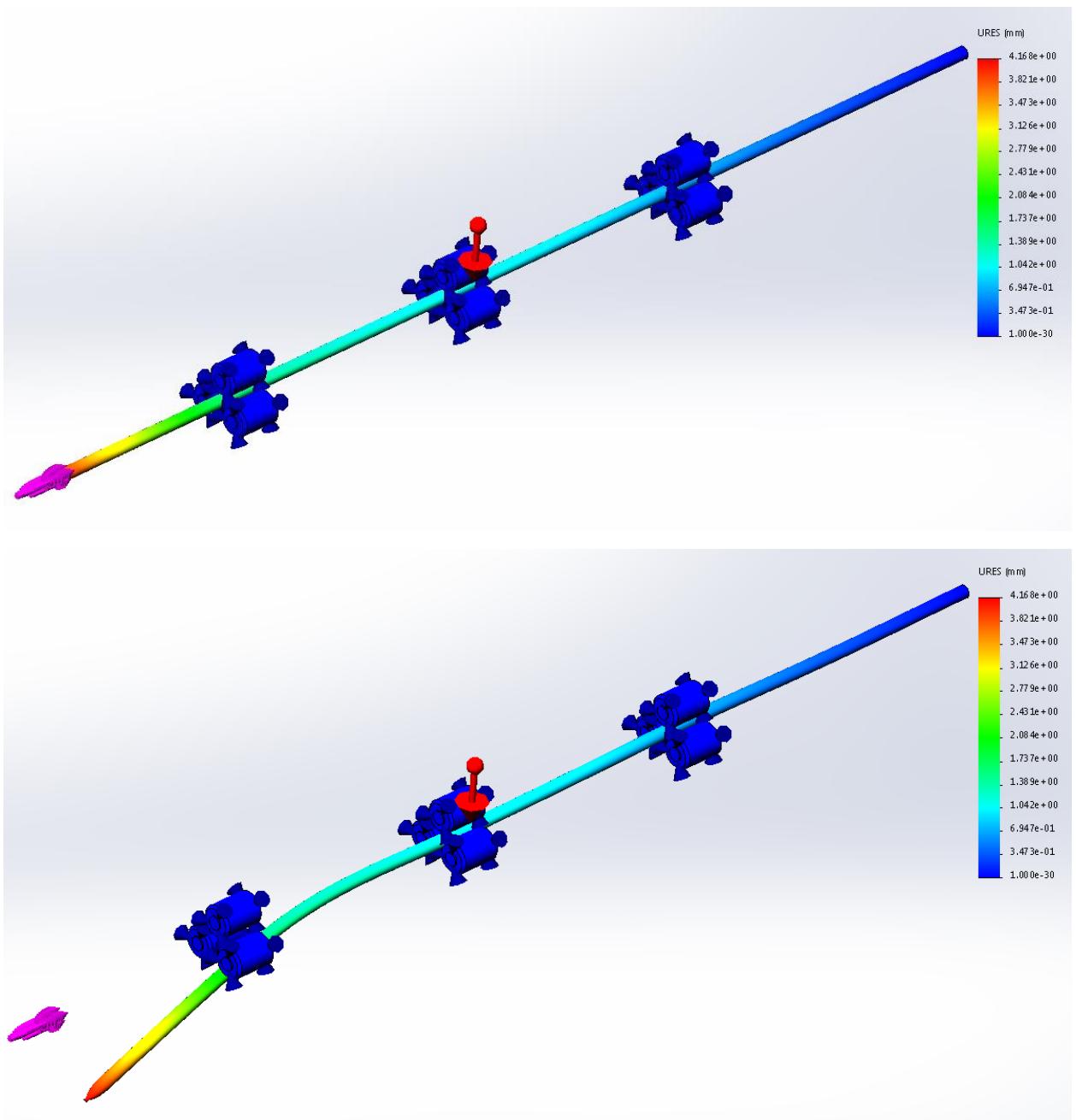


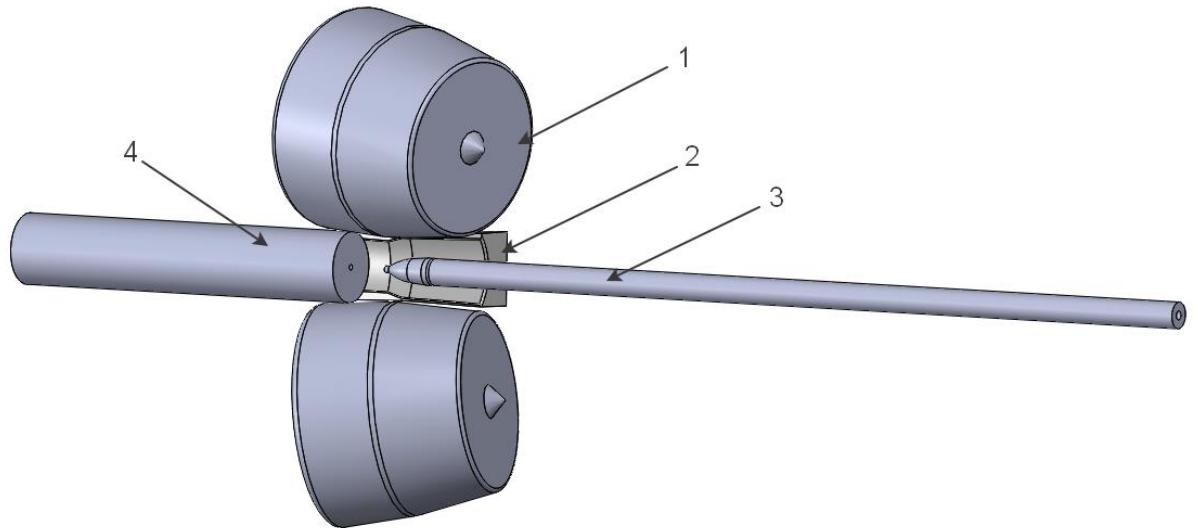
Рисунок 20 - Отклонение оправочного стержня от оси прокатки в реальных размерах (а) и с масштабным коэффициентом 220 (б).

### 3.2 Постановка задачи и создание модели очага деформации

Для оценки планируемых к получению заготовок были созданы два варианта моделирования, в которых изменяется геометрия стержня – в первом случае стержень прямой, во втором случае – деформированный под осевой нагрузкой. Все остальные параметры и геометрия рабочего инструмента

одинаковы для обоих вариантов. С целью минимизации ошибки геометрия деформированного стержня была импортирована напрямую из SolidWorks Simulation.

В программе SolidWorks построена трёхмерная модель очага деформации двухвалкового прошивного стана ТПА 70-270 АО «Выксунского Металлургического Завода» (ВМЗ) (рисунок 21), техническая характеристика которого приведена в работе [83].



1 – рабочий валок, 2 – направляющая линейка, 3 – прошивная оправка,  
4 – заготовка

Рисунок 21 - Модель очага деформации прошивного стана

Исходные данные, необходимые для построения очага деформации, на основе которых было проведено точное позиционирование рабочего инструмента и заготовки, приведены в таблице 11.

Таблица 11 - Параметры очага деформации

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| Схема                         | чашевидная |
| Угол подачи                   | 12°        |
| Угол раскатки                 | 7°         |
| Расстояние между валками      | 225 мм     |
| Расстояние между линейками    | 246 мм     |
| Коэффициент овализации        | 1,09       |
| Обжатие в пережиме            | 10%        |
| Обжатие перед носком оправки  | 7%         |
| Выдвижение оправки за пережим | 30 мм      |

На втором этапе создана компьютерная модель в программе Qform, эффективность которой в области моделирования процессов винтовой прокатки была показана в работах [84-87]. Параметры компьютерного моделирования приведены в таблице 12.

Таблица 12 - Исходные данные компьютерного моделирования винтовой прошивки

|  |                        |
|--|------------------------|
| Материал заготовки                                       | Сталь 45               |
| Начальная температура заготовки                          | 1170 °C                |
| Диаметр заготовки  | 250 мм                 |
| Длина заготовки  | 3200 мм                |
| Частота вращения валков                                  | 60 об/мин              |
| Материал рабочих валков                                  | 40Х                    |
| Материал оправки и линеек                                | 4Х5МФС                 |
| Фактор трения между валками и заготовкой                 | 5 по закону Леванова   |
| Фактор трения между оправкой и заготовкой                | 0,8 по закону Леванова |
| Фактор трения между направляющими линейками и заготовкой | 0,8 по закону Леванова |

Для стабильного протекания процесса прошивки заданы дополнительные граничные условия, симулирующие работу толкателя, входной и выходной проводок. С целью исключения проскальзывание металла в рабочих валках при моделировании, фактор трения между валками и заготовкой принят равным 5.

В качестве базовой настройки очага деформации выбраны следующие факторы, приведённые в таблице 10, которые позволяют обеспечить отсутствие осевого разрушения, стабильность процесса прошивки и требуемое качество полой заготовки [81].

После проведения моделирования и получения прошитых заготовок были осуществлены замеры толщины стенки в четырёх сечениях в восьми точках и построены два графика распределения разностенности по длине особотолстостенных заготовок, представленные на рисунке 22. В дальнейшем при проведении экспериментальных исследований были проведены аналогичные замеры для особотолстостенных заготовок, полученных в промышленных условиях. При сравнении моделирования и экспериментальных данных было выявлено, что максимальные значения разностенности соответствуют моделированию с деформированным стержнем, а минимальные – с недеформированным. Это также отражено на рисунке 22.

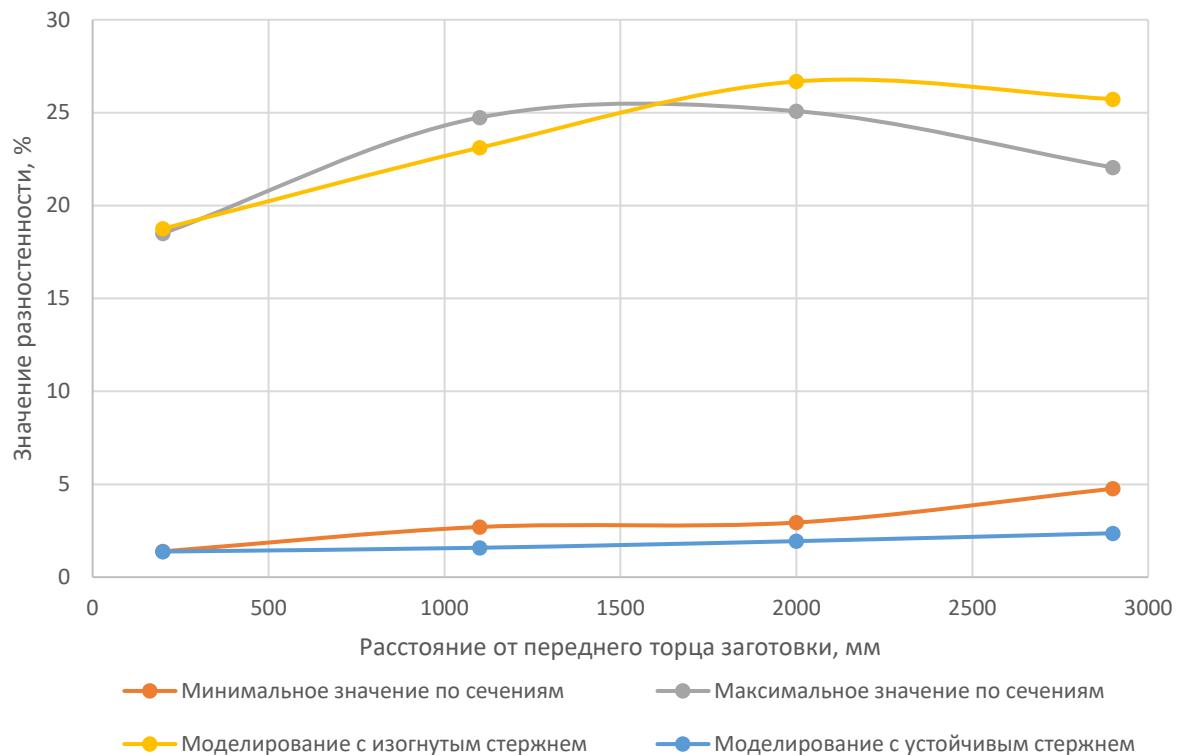


Рисунок 22 - Сравнение разностенности осб-листовых заготовок при моделировании и эксперименте

Дополнительно была проведена проверка адекватности модели на основе осевого усилия, действующего на оправочный стержень. В программном комплексе Qform проведён расчёт инструмента и получен график усилий, действующих на стержень, показанный на рисунке 23. Расчёт проводился для варианта моделирования с недеформированным стержнем. Среднее значение составило 490 кН, а рассчитанное аналитически – 458 кН. Разница значений не превышает 10%, что позволяет говорить об адекватности созданной модели.

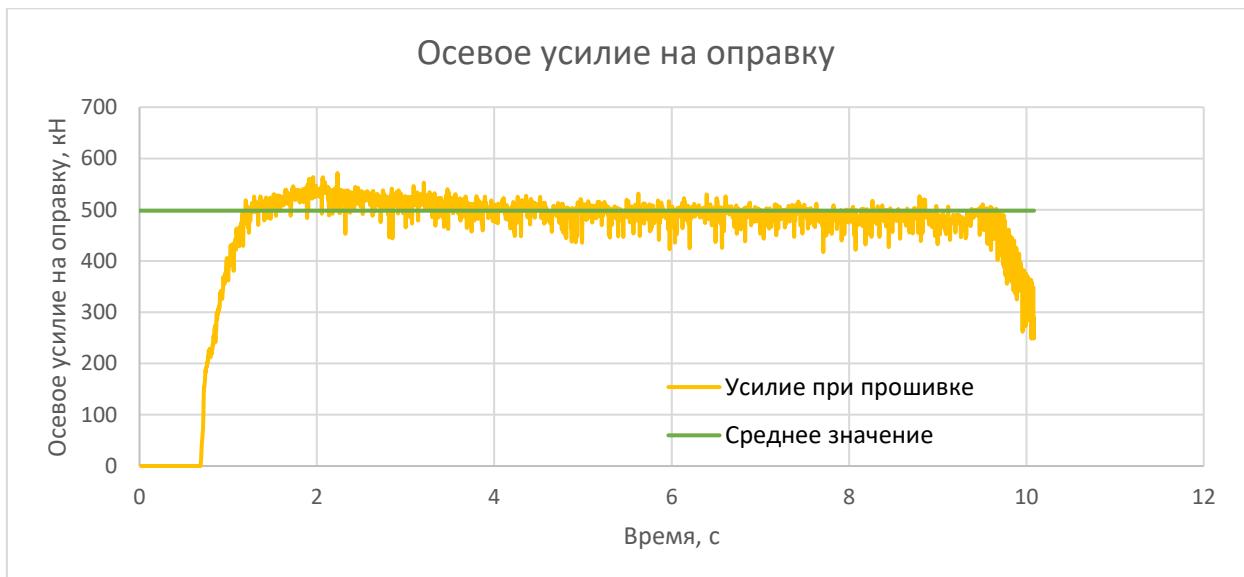


Рисунок 23 - График осевого усилия, действующего на оправочный стержень при моделировании

### 3.3 Исследование напряженно-деформированного состояния.

Уровень механических свойств металла железнодорожных осей в значительной мере определяется пластической деформацией НЛЗ и термической обработкой [88-90]. Введение в технологическую цепочку операции винтовой прошивки потенциально позволяет влиять на проработку структуры металла полых осей железнодорожных колес [91, 92]. К существенным особенностям деформации при винтовой прошивке можно отнести следующие: большая неравномерность и значительное количество циклов знакопеременных деформаций [93-95].

Как известно, напряженно-деформированное состояние (НДС) способа поперечно-винтовой прокатки определяет его особенности. Анализ соотношений параметров НДС таких как: интенсивность напряжений (ИН), интенсивность скоростей деформаций (ИСД), интенсивность конечных деформаций (ИКД) позволяет оценить влияние этого способа на деформирование структуры металла напряженного состояния [96-99].

Совместно с ПАО «Мотовилихинские заводы» была разработана конструкция черновой полой вагонной оси (рисунок 24). Для её производства необходимо было получить полуую заготовку с размерами DхS – 237x70 мм на агрегате ТПА 70-270 АО ВМЗ.

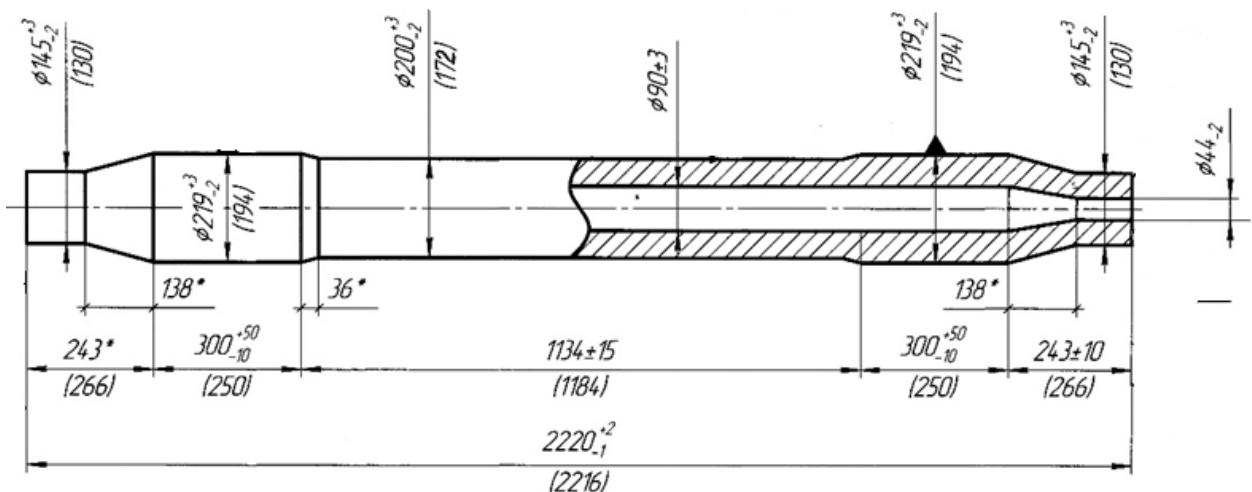


Рисунок 24 - Предлагаемая конструкция черновой полой вагонной оси

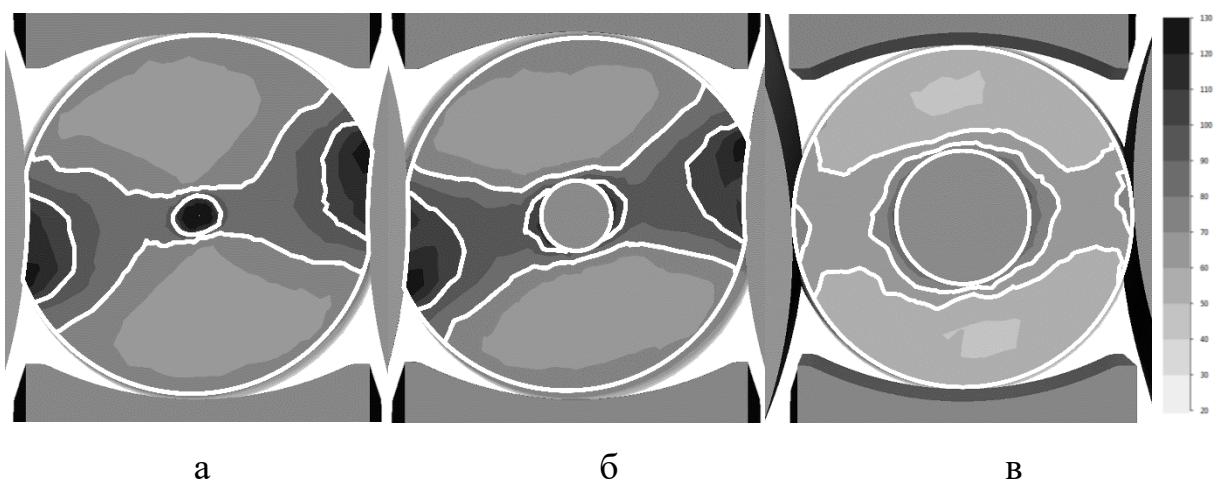
По этой причине в качестве объекта моделирования выбрана операция прошивки способом винтовой прокатки исходной заготовки  $\varnothing 250$  мм, длиной 750 мм, в полуую заготовку требуемых размеров. Существенной особенностью геометрических параметров полой заготовки является относительно большая толщина стенки (70 мм) и низкое соотношение  $D/S = 3.4$ , что обусловливает актуальность проводимого моделирования.

### 3.4 Проведенные исследования и анализ результатов моделирования НДС

Интенсивность напряжений (ИН) в значительной мере определяет степень проработки структуры металла. Для анализа ИН выбраны три характерных поперечных сечения по длине очага деформации. Первое сечение

– перед носком оправки, в котором осуществляется вторичный захват заготовки и начало формирования центрального отверстия. Второе сечение – в пережиме валков, в котором происходит максимальное обжатие заготовки. Третье – на калибрующем участке очага деформации, формирующее конечные геометрические параметры полой заготовки.

Оценка интенсивности напряжений проводилась в установившемся режиме прокатки. Поле распределения ИН по характерным сечениям представлено на рисунке 25.



а – перед носком оправки, б – в пережиме, в – на калибрующем участке  
 Рисунок 25 - Распределение интенсивности напряжений в трёх характерных сечениях для модели прошивки при угле подачи  $12^\circ$ ,  $\xi = 1.09$

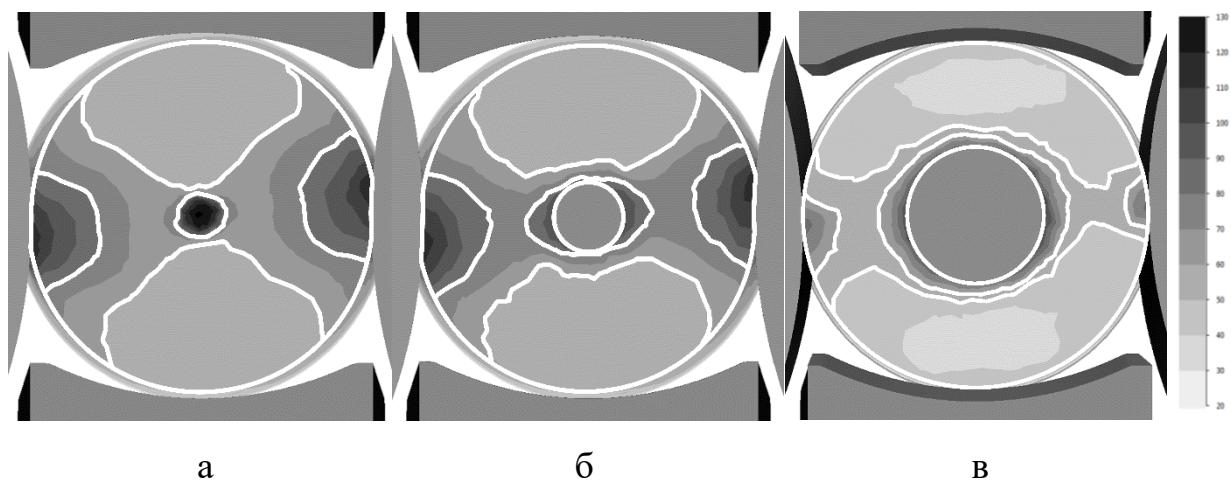
По результатам моделирования можно выделить 4 зоны распределения ИН в каждом из сечений. Первая располагается под рабочими валками, вторая – в месте касания носка оправки (рис.25, а) и вокруг прошивной оправки (рис.25 б, в), третья – под линейками и четвёртая – промежуточная X-образная зона, располагающаяся между тремя вышенназванными.

Наиболее высокие значения интенсивности напряжений отмечены в зонах под валками и вокруг оправки (100-130 МПа), наименьшие – под линейками (65-80 МПа). В первых двух сечениях зоны поля интенсивности напряжения имеют сходную форму. В третьем – распределение ИН более

равномерно, а её величина под валками и вокруг оправки ниже (70-80 МПа), чем в первых двух характерных сечениях.

Особенностью выделенных зон распределения ИН является их поворот относительно базовой системы координат. Для первых двух сечений угол разворота примерно равен углу подачи, а в третьем составляет около половины его величины.

Для сравнительной оценки полученных результатов проведено компьютерное моделирование процесса прошивки с альтернативными параметрами очага деформации: угол подачи уменьшен до  $6^\circ$ , коэффициент овализации до 1.05, обжатие в пережиме составляло 10%. Данная настройка очага деформации прошивного стана соответствует ранее распространённой и широко применявшейся в промышленности [100]. Характерные сечения для оценки ИН выбраны аналогично первому варианту (рисунок 26).



а – перед носком оправки, б – в пережиме, в – на калибрующем участке  
Рисунок 26 - Распределение интенсивности напряжений в трёх характерных сечениях для модели прошивки при угле подачи  $6^\circ$ ,  $\xi = 1.05$

Распределение ИН при альтернативной настройке очага деформации имеет схожий характер с базовой и позволяет выделить аналогичные зоны. Так, в зоне под валками и перед носком оправки значения ИН для первых двух сечений лежат в диапазоне 80-120 МПа, под линейками – 52-60 МПа, а для

третьего – 60-80 МПа под валками, 60-110 МПа вокруг оправки и 35-50 МПа под линейками. При прошивке по базовому варианту среднее значение ИН в первом характерном сечении больше на 21,4%, во втором – на 20,6%, в третьем – на 22,2%, чем при прошивке по альтернативному варианту. Значения среднего ИН по сечению представлены в таблице 13.

Таблица 13 - Средние значения ИН по характерным сечениям

| Номер сечения | ИН, МПа     |      |
|---------------|-------------|------|
|               | Угол подачи |      |
|               | 6°          | 12°  |
| 1             | 64,9        | 78,8 |
| 2             | 65,9        | 79,5 |
| 3             | 48,7        | 59,5 |

Подобное различие в значениях ИН может быть объяснено влиянием нескольких факторов. Первый - возникновение дополнительных напряжений по причине большого числа циклов знакопеременных деформаций. Чем больше циклов деформации проходит заготовка, тем большее развитие получают дополнительные напряжения. Так, для базовой настройки заготовка проходит около 17 циклов знакопеременных деформаций, а для альтернативной настройки – 44 цикла.

Второй фактор – единичное обжатие, которое для базовой настройки очага деформации будет больше, чем для альтернативной, что ведёт к росту интенсивности напряжений.

Третий фактор – вероятное изменение температурного поля заготовки из-за контакта с инструментом и деформационного разогрева. Деформационный разогрев интенсивнее всего происходит в приповерхностных слоях заготовки, которые циклически испытывают сжимающие и растягивающие напряжения. По причине большого числа знакопеременных циклов деформационный разогрев при альтернативной

настройке очага деформации выше и, в следствии этого, интенсивность напряжений – ниже. Однако из-за большего числа циклов деформации увеличивается время контакта заготовки с оправкой при альтернативной настройке очага деформации, что приводит к подстуживанию металла и увеличению ИН вокруг оправки.

По результатам анализа поля ИН для двух вариантов очага деформации можно утверждать, что в связи с большим уровнем ИН возможность проработки структуры исходной заготовки при прошивке выше при базовой настройке, чем у альтернативной.

Значительный интерес представляет оценка главных напряжений и их сочетание в период заполнения очага деформации. Поле главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  в характерных сечениях представлено на рисунке 27.

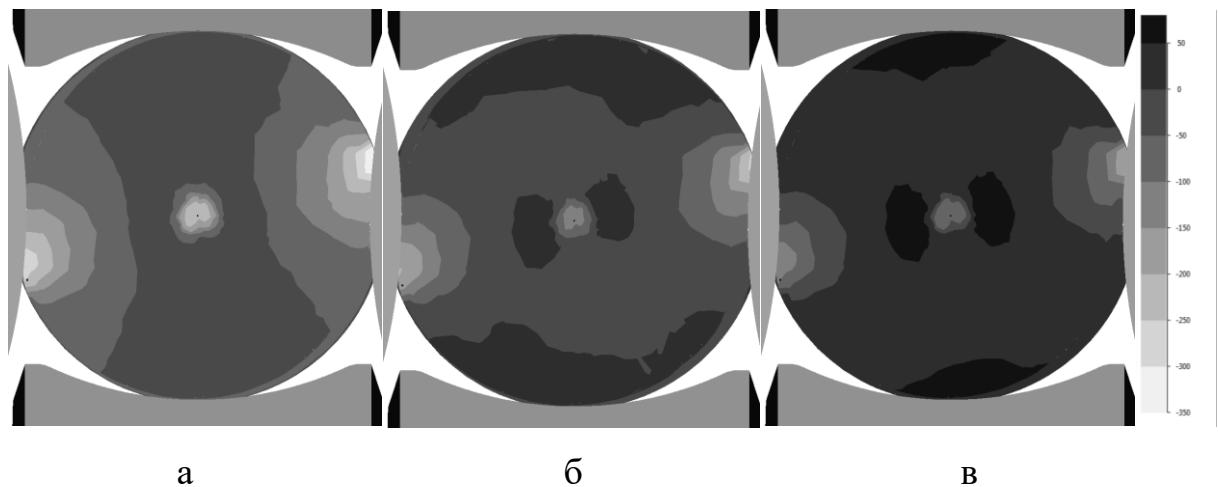


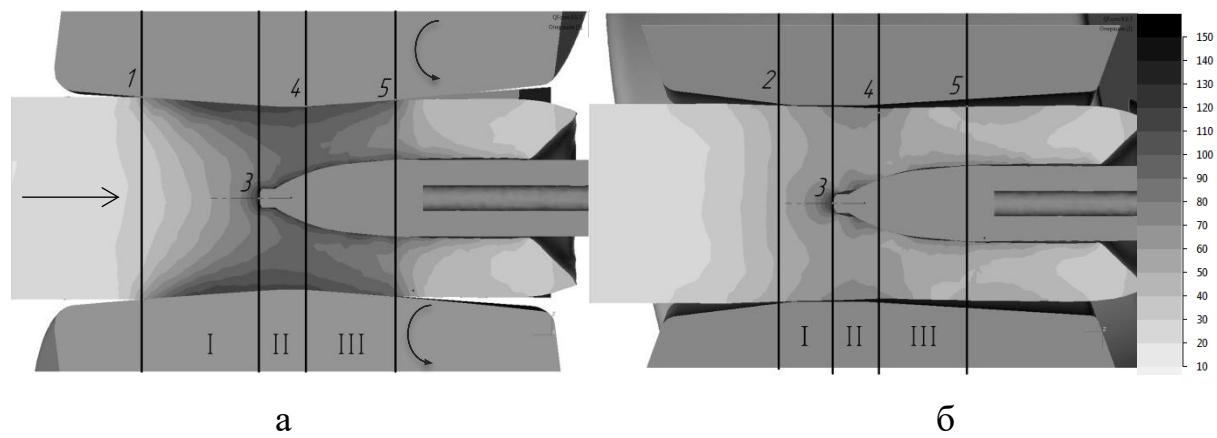
Рисунок 27 - Поле главных напряжений  $\sigma_1$  (а),  $\sigma_2$  (б) и  $\sigma_3$  (в) для угла подачи  $12^\circ$ ,  $\xi = 1.09$

Как видно, в первом характерном сечении значения  $\sigma_1$  в области под валками сжимающие, что обусловлено действием внешних сил (валков). Второе из главных напряжений  $\sigma_2$  также является сжимающим в зоне касания носка оправки заготовкой, что обуславливается воздействием прошивной оправки. Значение  $\sigma_3$  в области под линейками, в отличие от других главных напряжений являются растягивающими, что может быть связано с действием

дополнительных напряжений из-за овализации поперечного сечения заготовки.

Качественная оценка главных напряжений показала существование в очаге деформации объёмной разноимённой схемы действия главных напряжений, что соответствует современным представлениям о процессе винтовой прошивки и подтверждает адекватность модели.

Значительный интерес представляет распределение ИН по длине очага деформации в двух продольных сечениях – по рабочим валкам и направляющим линейкам, приведённое на рисунке 28 для базовой настройки. В каждом из этих продольных сечений можно выделить три характерных участка ИН, расположенных последовательно по длине очага деформации.



I – первый участок, II – второй участок, III – третий участок

Рисунок 28 - Продольные сечения очага деформации (базовая настройка) по валкам (а) и линейкам (б)

Границы участков выбраны с использованием характерных точек очага деформации: 1 и 2 – место касания заготовки рабочих валков и направляющих линеек, 3 и 4 – в сечении контакта переднего торца заготовки с носком оправки и окончанием пережима, 5 – в точке схода гильзы с рабочих валков [101].

Для сечения по валкам на первом участке (I) наблюдается неравномерное распределение ИН в диапазоне 35-140 МПа. Под валками значения ИН растут быстрее, а в центральной части наблюдается их некоторое

снижение при достижении максимальных значений у носка оправки. Значения ИН для второго участка (II) находятся в пределах 85-140 МПа, а её распределение носит более равномерный характер. Наибольшие значения наблюдаются у валков и прошивной оправки. Третий участок (III) характеризуется высоким уровнем ИН – 120-130 МПа. На нём заканчивается формирование менее проработанной кольцевой зоны на расстоянии 0,2-0,7 S от внутренней поверхности толстостенной заготовки, характеризуемой снижением  $\approx$  до 80 МПа.

Для сечения по направляющим линейкам картина распределения ИН имеет несколько иной характер. Так на первом участке ИН возрастает с 35 до 65 МПа, однако в зоне перед носком оправки наблюдается её резкий рост до значений 130 МПа. На втором участке ИН находится в пределах 65-100 МПа, и её максимальные значения также отмечены вблизи прошивной оправки, а третий - характеризуется снижением уровня ИН с 80 МПа у прошивной оправки до 50 МПа по мере приближения заготовки к выходу из очага деформации.

Для альтернативной настройки (при  $\beta = 6^\circ$ ) распределение ИН по длине очага деформации имеет подобный характер.

Также, на первом участке продольного сечения по валкам наблюдается высокая неравномерность распределения ИН (30-110 МПа), а ее максимальное значение наблюдается у рабочих валков. Второй участок характеризуется повышением значений ИН до 65-130 МПа, а на третьем происходит снижение ИН как в зонах контакта с рабочим инструментом, так и в остальном объёме заготовки.

Для сечения под направляющими линейками распределение ИН аналогично базовой настройке. На первом участке наблюдается рост ИН с 30 до 55 МПа, а в точке 3 значения достигают 130 МПа. На втором и третьем уровень значений составляет 30-45 МПа.

Значительный интерес представляет также изучение параметра интенсивности скорости деформации (ИСД), позволяющий качественно

оценить деформирование структуры заготовки в характерных сечениях по длине очага деформации. Проведена оценка ИСД в двух сечениях для базовой настройки – перед носком оправки и в пережиме рабочих валков. Сечение на калибрующем участке не рассматривалось по причине малых скоростей деформаций, не превышающих  $5 \text{ с}^{-1}$ . Полученные результаты распределения поля ИСД представлены на рисунке 29.

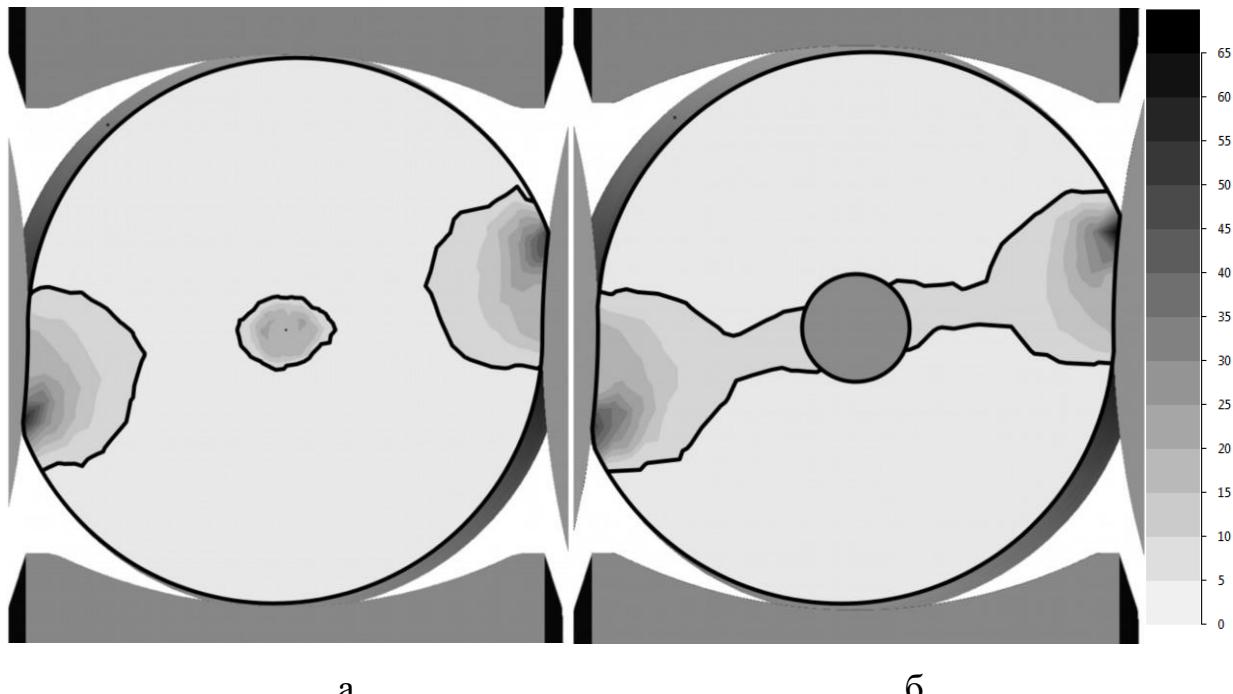


Рисунок 29 - Распределение поля ИСД перед носком оправки (а) и в пережиме рабочих валков (б) для базовой настройки очага деформации

В первом сечении наблюдаются три основных области ИСД – две под валками со значениями в диапазоне  $5-45 \text{ с}^{-1}$  и одна перед носком оправки с меньшей величиной –  $5-20 \text{ с}^{-1}$ . Меньшие значения ИСД областей под валками смешены к центру заготовки, а перед носком оправки располагаются ближе к периметру. Во втором сечении происходит объединение областей ИСД от валков и оправки в две более крупные, а рост максимальных значений ИСД в них достигает  $55 \text{ с}^{-1}$ .

Для альтернативной настройки очага деформации характерным является то, что в первом сечении наблюдаются две области распределения ИСД под валками, а перед носком оправки ярко выраженной области нет, и значения ИСД в ней не превышают  $4 \text{ c}^{-1}$ . Площадь областей под валками в сравнении с базовой настройкой меньше, а количественные показатели ИСД находятся в диапазоне  $5-25 \text{ c}^{-1}$ . Во втором сечении вокруг оправки также не наблюдается области повышенной ИСД и не происходит укрупнения областей под валками – они имеют примерно такие же размеры, как и в первом сечении, но отмечен рост максимальных значений ИСД с  $25$  до  $30 \text{ c}^{-1}$ .

Анализ полученных результатов позволяет говорить о схожести распределения ИН и ИСД по двум рассматриваемым характерным поперечным сечениям очага деформации. Так расположение, форма и площадь областей ИСД со значениями более  $5 \text{ c}^{-1}$  по поперечным сечениям для базовой настройки (см. рисунок 29) достаточно близки к значениям ИН более  $90 \text{ МПа}$  (рис. 25а, 25б).

На заключительном этапе исследований дополнительно был проведен анализ проработки структуры используя параметр интенсивности конечных деформаций (ИКД).

В программном комплексе Qform расчет компонент тензора деформаций производится на основе конечных деформаций Генки по формуле [102]:

$$E_{L_{ij}} = \int_L dE_{L_{ij}} = \int_t \dot{\varepsilon}_{ij} dt = \sum_n \dot{\varepsilon}_{ij} \Delta t_n, \quad (9)$$

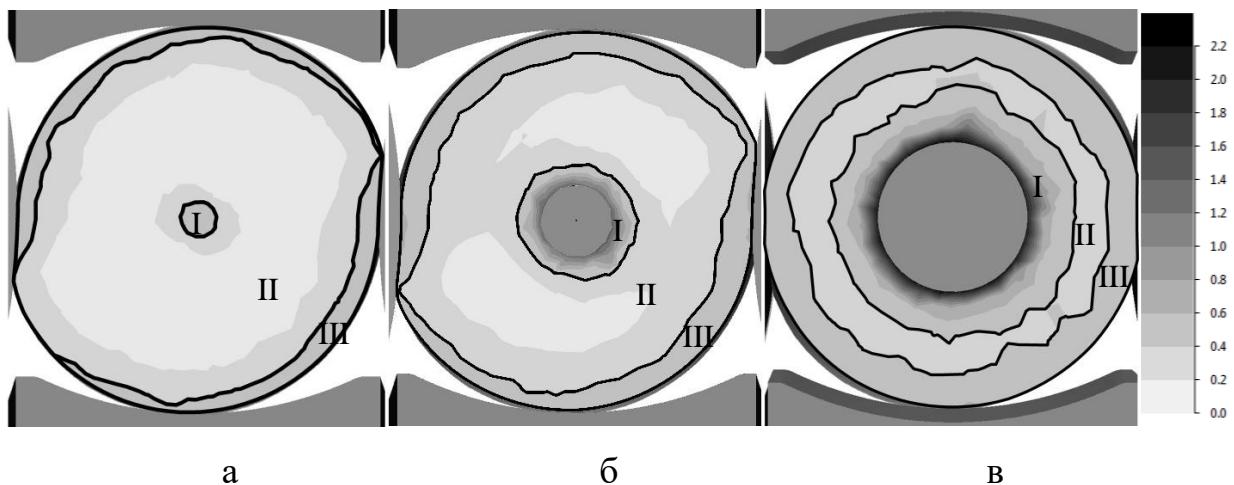
где  $E_{L_{ij}}$  – компонента тензора конечных деформаций,  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  – скорость деформации [ $\text{c}^{-1}$ ],  $\Delta t_n$  – приращение времени на  $n$ -ом шаге расчёта

Параметр интенсивности конечных деформаций возможно применить в качестве основного критерия деформирования структуры заготовки:

$$\begin{aligned}
 \bar{E} &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(E_1 - E_2)^2 + (E_2 - E_3)^2 + (E_3 - E_1)^2} = \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{((\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2)^2 + (\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3)^2 + (\dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1)^2) \Delta t} = \dot{\bar{\varepsilon}} \Delta t,
 \end{aligned} \tag{10}$$

где  $\bar{E}$  – интенсивность деформаций,  $E_i$  – главные деформации,  $\dot{\varepsilon}_i$  – главные скорости деформации,  $\dot{\bar{\varepsilon}}$  – интенсивность скоростей деформации

Оценка ИКД для базовой настройки очага деформации проводилась в трёх сечениях – перед носком оправки в момент внедрения её в заготовку, в пережиме валков и на калибрующем участке.

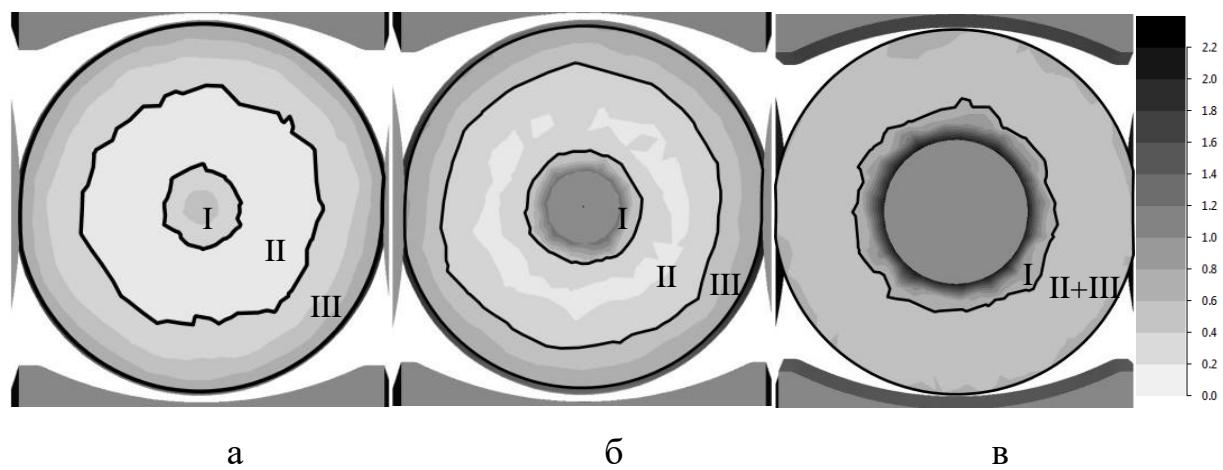


I – центральная область II – промежуточная область III – приповерхностная область

Рисунок 30 - Распределение поля ИКД перед носком оправки (а), в пережиме рабочих валков (б) и на калибрующем участке (в) для базовой настройки очага деформации

В каждом из сечений (рисунок 30) можно выделить по три концентрических области распределения ИКД. Первая - с наибольшим параметром ИКД располагается по центру заготовки перед носком оправки в первом сечении и вокруг оправки – в двух остальных. Вторая область с меньшим значением ИКД располагается в приповерхностных слоях заготовки.

Третья – промежуточная с минимальной ИКД. Во втором сечении в промежуточной области под линейками отмечены участки с минимальным значением ИКД. Такой характер изменения ИКД обусловлен процессом накопления этого параметра в процессе перемещения заготовки по очагу деформации. Таким образом обеспечивается высокая вероятность проработки структуры материала заготовки, обусловленная воздействием рабочих валков и прошивной оправки. Приведённые данные соответствуют процессу прошивки с вытяжкой  $\mu=1,34$ .



I – центральная область II – промежуточная область III – приповерхностная  
область

Рисунок 31 - Распределение поля ИКД перед носком оправки (а), в пережиме  
рабочих валков (б) и на калибрующем участке (в) для альтернативной  
настройки очага деформации

Для альтернативной настройки очага деформации выбраны три аналогичных сечения и построены поля распределения ИКД в них (рисунок 31). В первых двух сечениях области ИКД соответствуют базовой настройке. В третьем сечении можно выделить только две области. Характер распределения указанных областей носит более правильный концентрический характер.

Сравнив полученные результаты можно сделать выводы о том, что для альтернативной настройки очага деформации значения ИКД в поперечном сечении распределены более равномерно. Это может быть связано с тем, что металл заготовки подвергается большему количеству циклов знакопеременных деформаций.

На основе данных, приведённых в работе, можно предположить возможность равномерной проработки металла при добавлении операции предварительной деформации и/или операции раскатки после прошивки [103].

## **Глава 4. Промышленное апробирование технологии производства полых вагонных осей**

На основе проведённых исследований были разработаны технологические режимы прошивки сплошной заготовки и получения полой заготовки на стане винтовой прокатки, а также деформирования на РКМ и получения черновой полой оси РУ1Ш разработанной конструкции. Проведено апробирование технологического процесса производства полых вагонных осей в промышленных условиях.

Совместно с АО ВМЗ и ПАО «Мотовилихинские заводы» «была разработана цепочка технологических операций, позволяющая получить черновые и чистовые вагонные оси. Данная технологическая цепочка включала в себя следующие операции:

1. Отливка исходной непрерывнолитой заготовки (Камасталь)
2. Ковка непрерывнолитой заготовки до круглого сечения (ПАО «Мотовилихинские заводы»)
3. Прошивка сплошной круглой заготовки на ТПА 70-270 и получение полой осевой заготовки (АО ВМЗ)
4. Профилирование полой осевой заготовки на РКМ, её термическая обработка и получение черновой полой оси (ПАО «Мотовилихинские заводы»)
5. Механическая обработка черновых осей до чистовых размеров (ПАО «Мотовилихинские заводы»)

### **4.1 Получение исходных заготовок для прошивки**

Для изготовления исходных заготовок, НИТУ МИСИС, АО ВМЗ и ПАО «Мотовилихинские заводы» были разработаны совместно технические условия на заготовку. Отливку осевой стали и ковку на радиально-ковочной

машине SXP-55 (рисунок 32, технические характеристики представлены в таблице 14) осуществляли на ПАО «Мотовилихинские заводы».

Таблица 14 - Технические характеристики РКМ SXP-55

| Название | Максимальный диаметр заготовки, мм | Минимальный диаметр поковки, мм | Усилие ковки на боек, МН | Количество ходов в минуту, 1/мин | Диапазон регулирования по диаметру, мм | Установленная мощность ковки, кВт |
|----------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| SX-55    | 600                                | 80                              | 12                       | 200                              | 330                                    | 2300                              |



Рисунок 32 – Радиально-ковочная машина ПАО «Мотовилихинские заводы»

Была изготовлена партия заготовок диаметром 250 мм. и длиной 2500 мм. Химический состав и механические свойства стали ОС в состоянии поставки приведен в таблице 15 и таблице 16 соответственно.

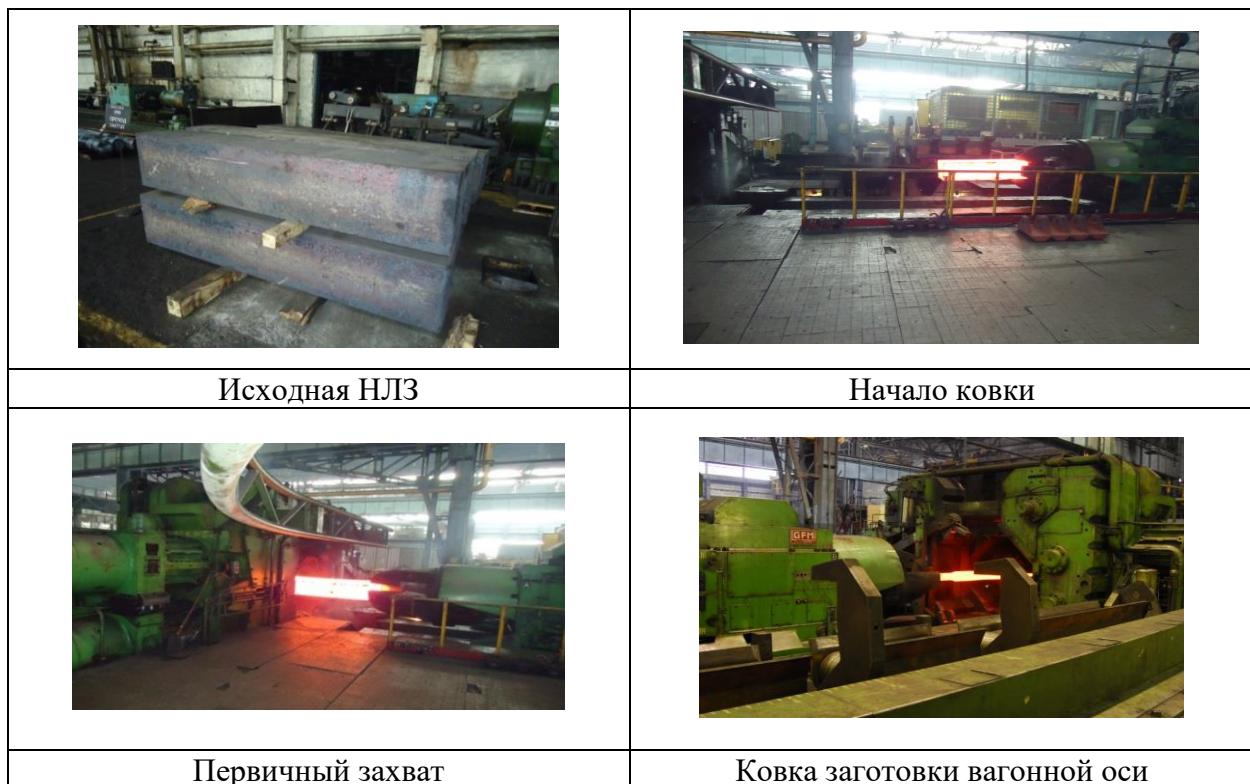
Таблица 15 – Химический состав стали ОС по ГОСТ и в состоянии поставки.

|          | Массовая доля химических элементов, % |           |                     |            |            |       |      |       |    |      |
|----------|---------------------------------------|-----------|---------------------|------------|------------|-------|------|-------|----|------|
|          | C                                     | Si        | Mn                  | P          | S          | Al    | Cr   | Cu    | Mo | Ni   |
| ГОСТ     | 0,42<br>-0,5                          | 0,15<br>- | 0,6-<br>0,9<br>0,35 | <0,03<br>5 | <0,03<br>5 | -     | <0,3 | <0,25 | -  | <0,3 |
| Поставка | 0,44                                  | 0,21      | 0,67                | 0,008      | 0,006      | 0,015 | 0,08 | 0,17  | —  | 0,11 |

Таблица 16 – Механические свойства стали ОС по ГОСТ и в состоянии поставки.

|          | Сопротивление при растяжении $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> | Предел текучести $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> | Относительное удлинение $\delta, \%$ | Относительное сужение $\Psi, \%$ | Ударная вязкость при 20° С, Дж/см <sup>2</sup> |             |
|----------|---|---|--------------------------------------|----------------------------------|--|-------------|
|          |   |   |                                      |                                  | средняя  | Минимальная |
| ГОСТ     | 650 и более   | -   | 18                                   | -                                | 34   | 29          |
| Поставка | 650   | 365   | 26,0                                 | 51                               | 67,3   | 66          |

Выплавка стали производилась в печи ДСП-60/70, после чего сталь обрабатывали на агрегате «печь-ковш» с целью проведения окончательного раскисления, десульфурации и модифицирования. Для обеспечения высоких конечных свойств сталь подвергалась вакуумированию на установке VD/VOD. После вакуумирования сталь отливали на установке непрерывной разливки стали в блюмы сечением 540x480 мм. В дальнейшем блюмы деформировали до круглого сечения на РКМ с общим уковом 3,9 до диаметра 250 мм (рисунок 33). Заготовки были изготовлены с учетом требований разработанного ТУ РГ 0910-280-0001-2011.



|   |  |
|---|--|
|  |  |
| Окончание ковки   | Черновая заготовка для вагонной оси  |

Рисунок 33 – Ковка заготовок на РКМ SXP-55 ПАО «Мотовилихинские заводы»

Результаты исследования макроструктуры показали наличие центральной пористости 0,5 балла, а также следующие средние значения неметаллических включений:

- оксиды точечные – 0,5 балла
- силикаты хрупкие – 0,9 балла
- силикаты недеформирующиеся – 1,9 балла
- сульфиды – 1,1 балла

Полученные результаты соответствовали требованиям ГОСТ 4728-2010 «Заготовки осевые для железнодорожного подвижного состава. Технические условия».

#### **4.2 Изготовление полых осевых заготовок методом винтовой прошивки**

Оевые заготовки диаметром 250 мм были поставлены на ОАО ВМЗ для последующей прошивки на агрегате ТПА 70-270. Основной сортамент данного ТПА составляют бесшовные горячекатаные трубы из низкоуглеродистых и углеродистых марок стали с внешним диаметром  $D = 73 \div 269,9$  мм, и толщиной стенки  $S = 11 \div 30$  мм. Основные технические характеристики стана представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Технические характеристики прошивного-раскатного стана

| Наименование                    | Показатель     |
|---------------------------------|----------------|
| 1                               | 2              |
| Диаметр заготовки               | 80 - 260 мм    |
| Длина заготовки                 | 1500 - 4000 мм |
| Масса заготовки, не более       | 1000 кг        |
| Диаметр калибра                 | 80 - 260 мм    |
| Диаметр валков в пережиме       | 680 - 750 мм   |
| Длина бочки валка               | 600 мм         |
| Угол подачи                     | 12°            |
| Угол раскатки                   | 7°             |
| Частота вращения рабочих валков | 50 - 60 об/мин |
| Момент прокатки на одном валке  | 200 кНм        |
| Параметры заготовки:            |                |
| - диаметр                       | 70 - 270 мм    |
| - длина                         | 3 - 6 м        |
| - толщина стенки                | 6 - 40 мм      |
| - масса, не более               | 1000 кг        |
| - температура                   | 1200°C         |

Базовая технология производства бесшовных труб на ТПА 70-270 состоит из следующих технологических операций (рисунок 34): исходную заготовку при помощи дисковой пилы разделяют на отдельные заготовки, на торцы которых в дальнейшем наносят зацентровочные углубления. После этого зацентрованные заготовки помещают в печь с шагающими балками и нагревают до температуры прокатки. Нагретые заготовки подают на входную сторону рабочей клети прошивного стана и прошивают. При необходимости производится автоматизированная замена оправки и последующая раскатка. По окончании процесса полые заготовки калибруют в трёхвалковом стане по наружному диаметру и охлаждают при помощи водяных спрееров.

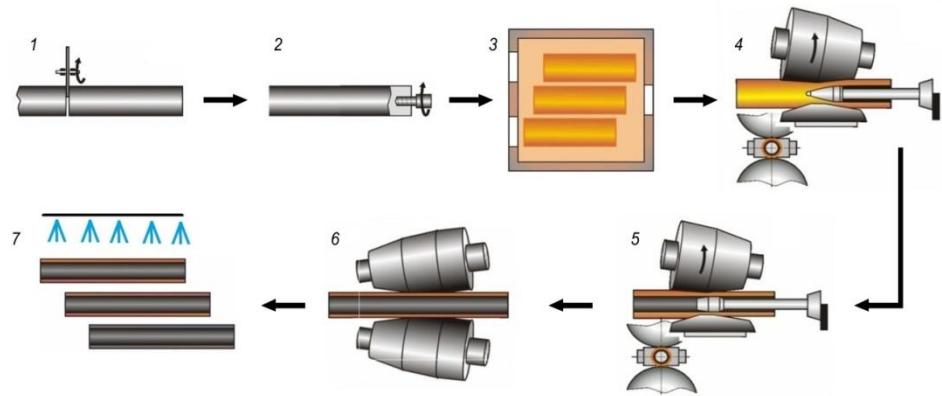


Рисунок 34 – Технологическая схема производства бесшовных труб на ТПА 70-270

Поставленные заготовки (рисунок 35) отвечают всем необходимым требованиям, как по точности геометрических размеров (таблица 18), так и по свойствам (сертификаты №1807/31).

Геометрические размеры исходных заготовок выбраны с учетом конструктивных особенностей нагревательной печи, а также входной и выходной стороны прошивного стана. Также выбор заготовок был обусловлен возможностью получения различных конструкций полых вагонных осей (вагонная ось типа РУ1Ш (экспериментальная конструкция), вагонная ось, разработанная ОАО «ВНИИЖТ»). На рисунке 36 показаны конструкции данных осей.



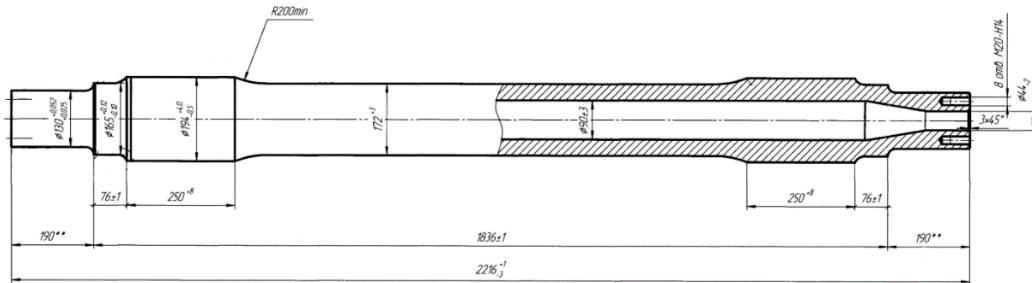
Рисунок 35 – Исходные заготовки в состоянии поставки в цех АО ВМЗ.

Замеры геометрических параметров заготовок проводились в трех сечениях. Полученные данные замеров показаны в таблице 17.

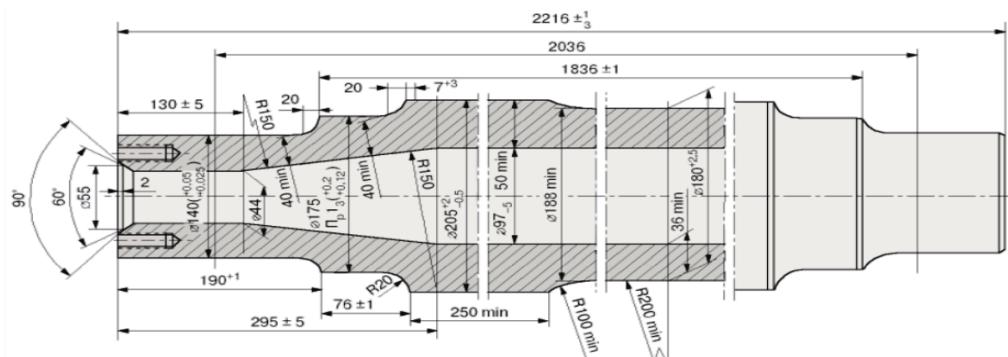
Таблица 18 – Замеры исходных заготовок.

| Тип       |  |                      |                |
|-----------|--|----------------------|----------------|
|           | 1 сечение  | 2 сечение            | 3 сечение      |
| 250<br>мм | 1 сечение  | 2 сечение (середина) | 3 сечение      |
|           | D <sub>1</sub>   | D <sub>2</sub>       | D <sub>1</sub> |
| №1        | 251,6  | 252,4                | 251,4          |
| №2        | 250  | 250,7                | 250,4          |
| №3        | 251,4  | 251,8                | 250,5          |
| №4        | 251,2  | 251,8                | 251,6          |
| №5        | 250,9  | 251,3                | 251,1          |
| №6        | 251,7  | 252,1                | 251,6          |
|           |  |                      | L <sub>3</sub> |
|           |  |                      | 2354           |
|           |  |                      | 2554           |
|           |  |                      | 2554           |
|           |  |                      | 2554,5         |
|           |  |                      | 2555           |
|           |  |                      | 2554,5         |

Важной особенностью предлагаемой конструкции является её полная унификация по внешним размерам с находящимися в эксплуатации сплошными вагонными осями, а также то, что её масса ниже массы сплошных осей на 97 кг.



а) Примерная конструкция полой вагонной оси типа РУ1Ш



б) Полая вагонная ось 25 тс, разработка ОАО «ВНИИЖТ»

Рисунок 36 - Полье вагонные оси двух типов: а), б).

Для оценки прочности разработанной конструкции был проведён расчёт полой вагонной оси вероятностным методом на основе методики ВНИЖТ, который учитывает случайный характер эксплуатационных нагрузок на ось при высоком уровне напряжений. Критерием оценки является коэффициент запаса усталостной прочности, который для осей грузовых вагонов не должен быть ниже двух, вычисляющийся по следующей формуле [104]:

$$n = \frac{2 \cdot \alpha_{\min}}{e^{\frac{(t)^2}{2} - (m-1)}} \cdot \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_c [\Phi(t_{\max}) - \Phi(t_{\min})]}} \geq [n] \quad \Pi(11)$$

где  $m$  - показатель степени в уравнении кривой усталости, зависящей от свойств материала и технологии изготовления, принимается для накатанных осей  $m=18$ , а для ненакатанных  $m=8$ ;

$N_0$  - базовое число циклов, для осей принимается  $N_0 = 10^8$  ;

$N_c$  - суммарное число циклов за срок службы оси

$N_c = 1,210^9$  - для осей пассажирских вагонов;

$N_c = 0,610^9$  - для осей грузовых и изотермических вагонов;

$f(\sigma_a)$  - функция плотности распределения вероятности амплитуд напряжений.

$\Phi(t_{\max})$ ,  $\Phi(t_{\min})$  - нормированные интегральные функции нормального распределения (функция Лапласа)

для осей пассажирских вагонов принято  $t_0 = 4,5$  , а для осей грузовых и изотермических вагонов  $t_0 = 4,0$ .

$\alpha_{\min}$  - минимальное значение коэффициента перегрузки оси

Для расчёта был выбран крытый грузовой вагон модели 11-286 и вагонная двухосная тележка 18-100 с соответствующими им массовыми характеристиками. В результате была получена схема расположения

контрольных сечений, приложения сил и эпюра моментов, представленные на рисунке 37.

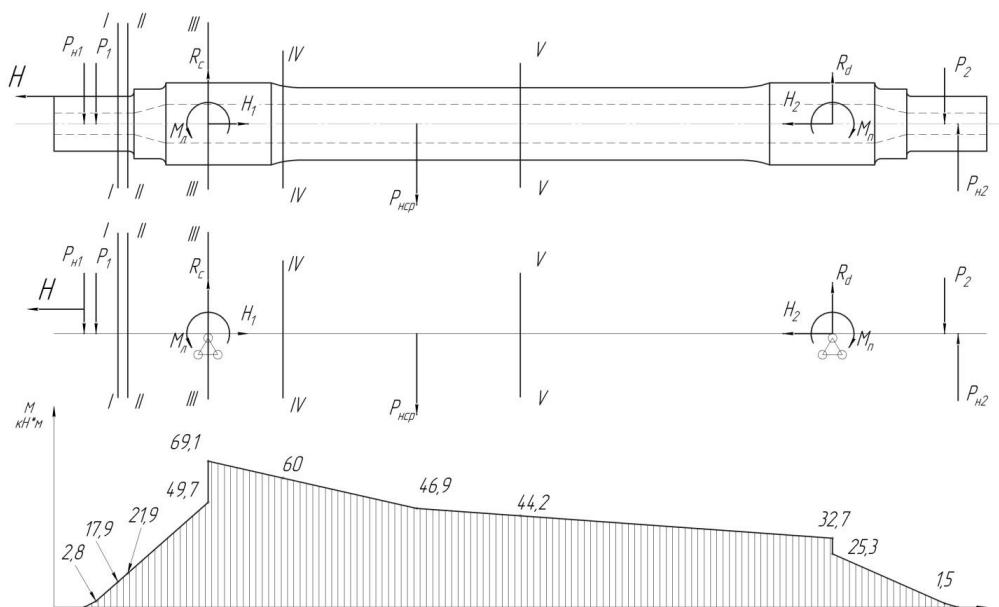


Рисунок 37 - Схема расположения контрольных сечений и приложения сил для расчёта вагонной оси вероятностным методом. Эпюра моментов.

Распределение коэффициентов запаса усталостной прочности по сечениям и сравнение их с аналогичными коэффициентами для сплошной оси представлены на рисунке 38. По результатам расчётов показано, что конструкция полой вагонной оси удовлетворяет предъявляемым требованиям.

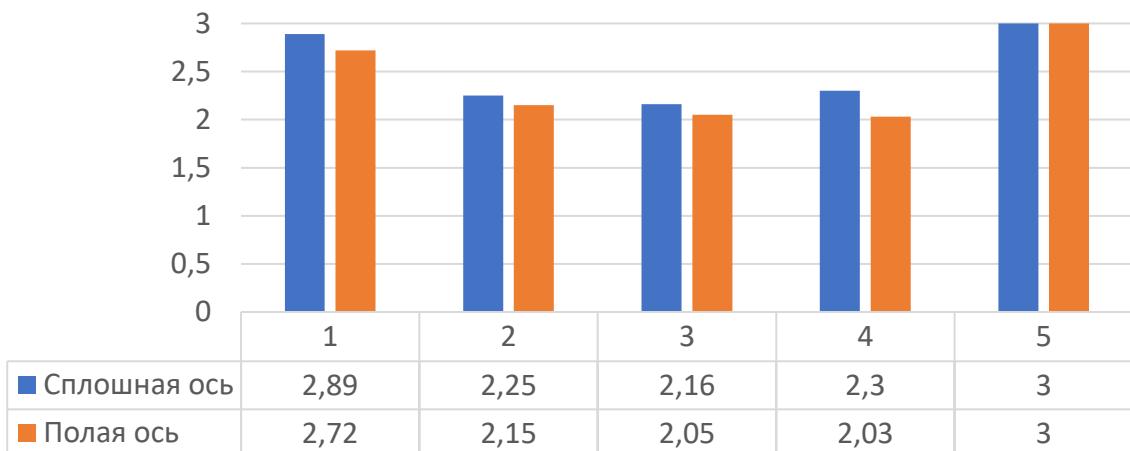


Рисунок 38 - Распределение коэффициентов запаса прочности по сечениям

При разработке конструкции вагонной оси и определении требований к полой осевой заготовке были разработаны ТУ 1308-118-05757848-2014 и ТУ «Черновые полые вагонные оси из прошитых особотолстостенных горячекатанных стальных труб. Опытная партия».

Для получения полых вагонных осей в соответствии с исходными заготовками выбраны геометрические параметры полых заготовок, которые необходимо было получить -  $D_t \times S_t \times L_t = 240 \times 70 \times 3200$  мм (рисунок 39).

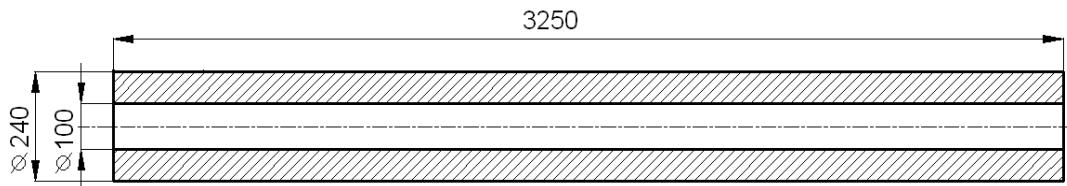


Рисунок 39 – Полая заготовка заготовка  $D_t \times S_t \times L_t = 240 \times 70 \times 3250$

Прошивка на промышленном агрегате ТПА 70-270 осуществлялась по следующей технологии.

Заготовки загружали в печь партиями, нагревали до температуры 1150 °С на протяжении 3,5-4 часов для равномерного прогрева заготовок по всему сечению и длине (рисунок 40).

|   |  |
|---|--|
|    |    |
| Загрузка заготовки в печь   | Выдача заготовки из печи   |
|    |    |
| Очаг деформации прошивного стана  | Прошивка заготовок   |
|  |  |
| Полученная гильза после прошивки  | Калибрование заготовки   |
|  |  |
| Охлаждение трубы  | Готовая труба  |

Рисунок 40 – Технологический процесс получение особотолстостенных труб.

Настроочные параметры очагов деформации заготовок показаны в таблице 19.

Таблица 19 – Настроочные параметры очага деформации для прошивки заготовок I типа

| №  | D <sub>3</sub> , мм | L <sub>3</sub> , мм | D <sub>T</sub> , мм | L <sub>T</sub> , мм | d <sub>T</sub> , мм | B, мм | Л, мм | d <sub>опр</sub> , мм | U <sub>п</sub> , % | ξ    | μ    |
|----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|-------|-----------------------|--------------------|------|------|
| №1 | 250                 | 2300                | 238                 | -                   | 98                  | 220   | 250   | 98                    | 12                 | 1,13 |      |
| №2 | 250                 | 2500                | 235                 | 2895                | 96                  | 220   | 239   | 96                    | 12                 | 1,08 | 1,38 |
| №3 | 250                 | 2500                | 236                 | 2775                | 96                  | 222   | 242   | 96                    | 11,2               | 1,09 | 1,37 |
| №4 | 250                 | 2500                | 237                 | 3112                | 96                  | 224   | 244   | 96                    | 10,4               | 1,08 | 1,3  |
| №5 | 250                 | 2500                | 237                 | 3112                | 96                  | 224   | 244   | 96                    | 10,4               | 1,08 | 1,3  |
| №6 | 250                 | 2500                | 237                 | 3115                | 96                  | 224   | 244   | 96                    | 10,4               | 1,08 | 1,3  |

Обозначения: В – расстояние между валками, Л – расстояние между линейками, d<sub>опр</sub> – диаметр оправки прошивной, U<sub>п</sub> – обжатие в пережиме, ξ – коэффициент овализации. Обжатие перед носком оправки 6-8 %, μ - коэффициент вытяжки. Выдвижение оправки принималось в соответствии со значением необходимой толщины стенки между валком и оправкой. Данное расстояние составляло 70 мм.

Очаг деформации прошивного стана для заготовок диаметром 250 мм показан на рисунке 41.

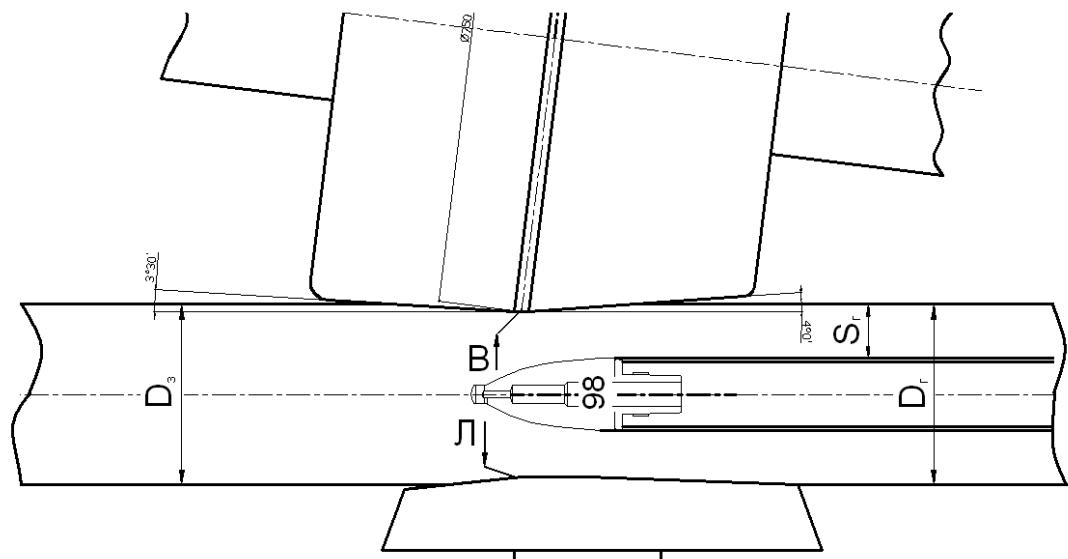


Рисунок 41 – Очаг деформации прошивного стана

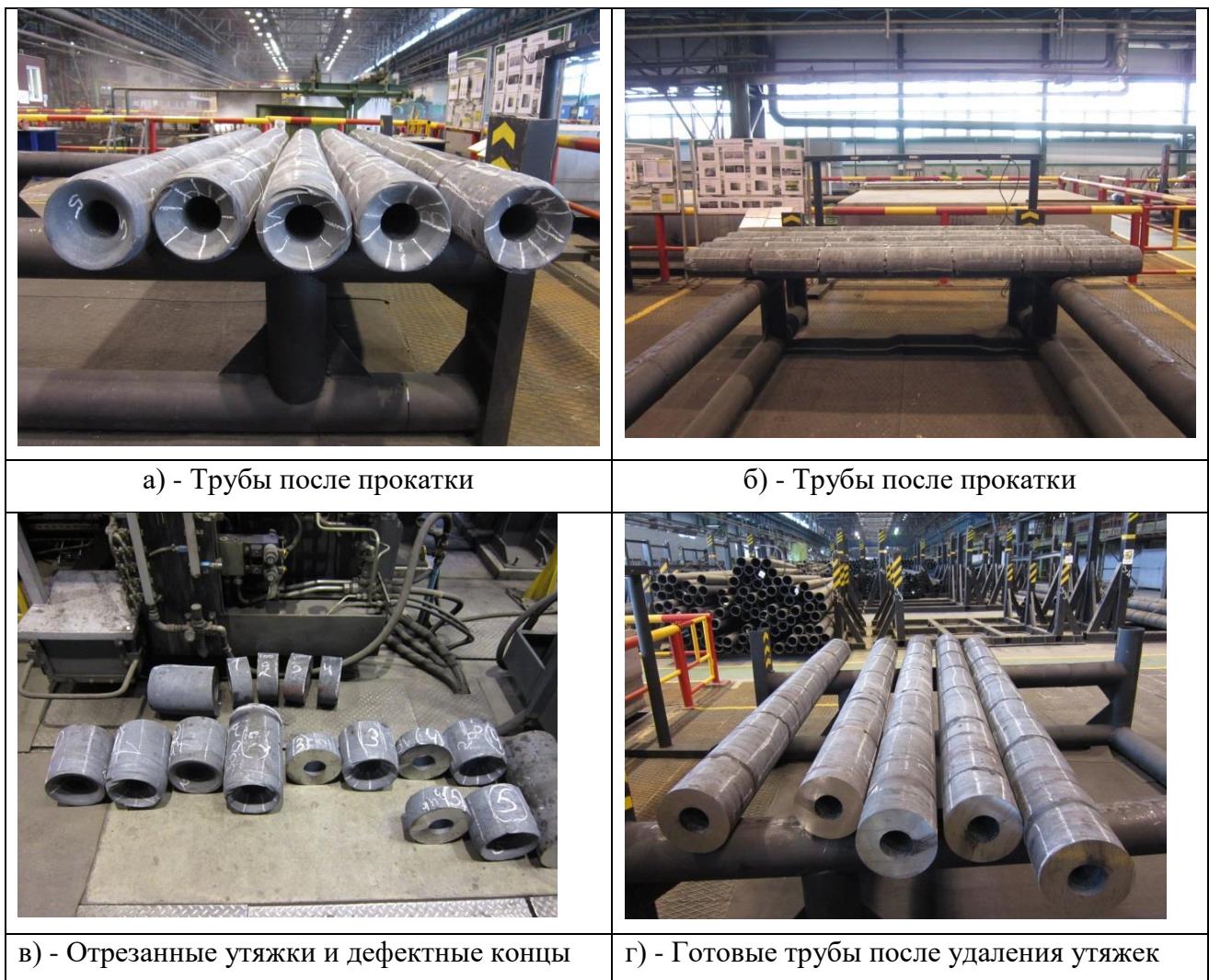


Рисунок 42 – Полые осевые заготовки после охлаждения

После прошивки, калибрования и охлаждения, особотолстостенные полые заготовки были преданы на приемный стол. Со всех заготовок были удалены утяжки, проведен визуальный осмотр внутренней и наружной поверхности.

В ходе проведенного эксперимента были получены особотолстостенные заготовки согласно технологическим схемам и таблицам прокатки с  $D/S = 3,4$  (рисунок 43)



Рисунок 43 – Общий вид полученных особотолстостенных заготовок

При выполнении работы были определены параметры прошитых особотолстостенных заготовок: разностенность, среднее значение толщины стенки, дисперсия толщины стенки, эксцентричность, точность по наружному диаметру, овальность заготовок, колебания среднего диаметра, дисперсия диаметров заготовок.

Измерение геометрических параметров заготовок производилось по следующей схеме: на заготовке размечалась середина, и от нее по одной линии

в левую и в правую сторону шагом 400мм производили замеры диаметра. После заготовку разворачивали на 90 градусов по оси и замеряли диаметры (рисунок 44). Замеры производились штангенциркулем с точностью 0,05мм.

Наружный диаметр измеряли с нескольких взаимно перпендикулярных сечениях, расположенных друг от друга на расстоянии 400 мм.

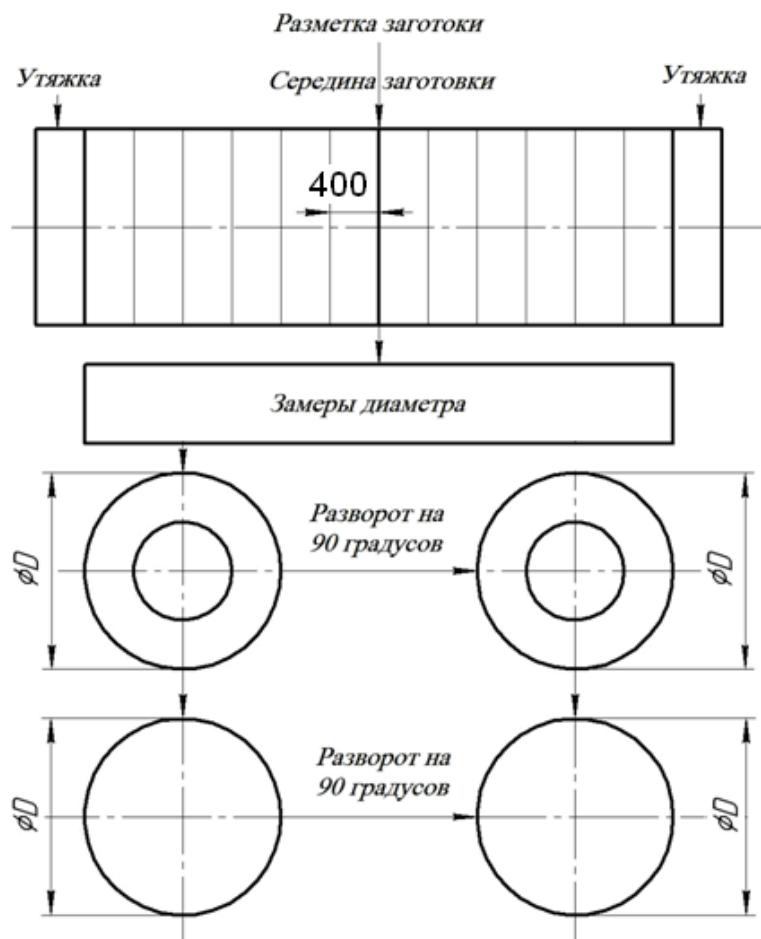


Рисунок 44 - Методика замера наружного диаметра заготовок

Результаты измерения внешнего диаметра заготовок показаны в таблицах 20-21, а также изображены на гистограмме рисунка 45.

Таблица 20 - Результаты значений наружных диаметров

| №    | 1 сечение      |                | 2 сечение      |                | 3 сечение      |                | 4 сечение      |                | 5 сечение      |                | 6 сечение      |                |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|      | D <sub>1</sub> | D <sub>2</sub> |
| №1.2 | 234            | 234            | 235            | 234            | 235            | 235            | 235            | 235            | 235            | 235            | 234,8          | 234,7          |
| №1.3 | 236            | 236            | 236,3          | 236,2          | 236            | 236            | 236,2          | 236            | 236,2          | 236            | 236,5          | 236,4          |
| №1.4 | 237            | 237            | 237            | 237            | 237            | 238            | 237,5          | 237,5          | 237,5          | 237,5          | 237,5          | 236            |
| №1.5 | 237            | 237            | 237            | 237            | 237            | 237            | 237            | 237            | 237,3          | 237,3          | 237            | 237            |
| №1.6 | 237            | 237            | 236            | 236,7          | 237            | 237            | 237            | 237            | 236,7          | 236            | 237            | 236,7          |
| №2.1 | 217            | 217            | 217,3          | 217            | 217            | 217            | 217,2          | 217,5          | 217,2          | 217            | 217,5          | 217            |
| №2.2 | 218            | 219            | 219            | 219            | 218            | 218            | 218,4          | 218,6          | 218,2          | 218,8          | 218            | 219            |

Таблица 21 – Точность заготовок по наружному диаметру

| №, заготовки | Сечени е | Доля эксцентричност и | Доля эксцентричности, % | Средняя точность одной заготовк а по толщине стенки, % | Средняя разностенность, мм |
|--------------|----------|-----------------------|-------------------------|--|----------------------------|
| 1.2          | 1        | 0,51                  | 51                      | 0,95   | 0,24                       |
|              | 2        | 0,00046               | 0,46                    |  |                            |
|              | 3        | 0,56                  | 56                      |  |                            |
| 1.3          | 1        | 0,38                  | 38                      | 2,03   | 0,50                       |
|              | 2        | 0,065                 | 6,5                     |  |                            |
|              | 3        | 0,013                 | 1,3                     |  |                            |
| 1.4          | 1        | 0,23                  | 23                      | 1,42   | 0,33                       |
|              | 2        | 0,20                  | 20                      |  |                            |
|              | 3        | 0,39                  | 39                      |  |                            |
| 1.5          | 1        | 0,36                  | 36                      | 1,14   | 0,26                       |
|              | 2        | 0,0003                | 0,03                    |  |                            |
|              | 3        | 0,40                  | 40                      |  |                            |
| 1.6          | 1        | 0,29                  | 29                      | 1,71   | 0,38                       |
|              | 2        | 0,00005               | 0,0005                  |  |                            |
|              | 3        | 0,046                 | 4,6                     |  |                            |

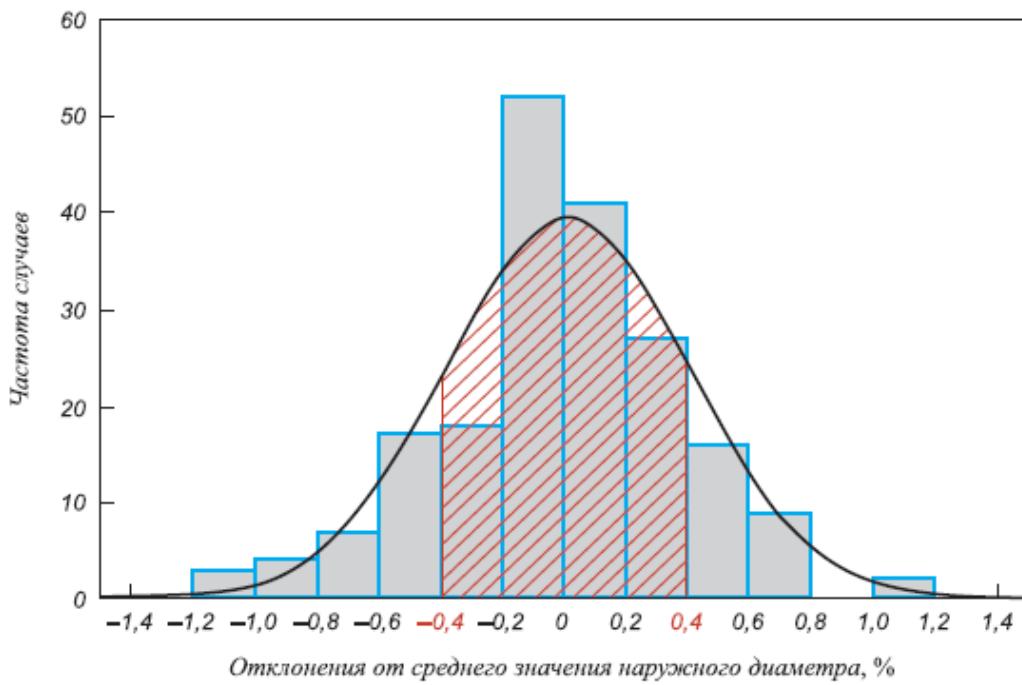


Рисунок 45 - Гистограмма распределения отклонений по наружному диаметру заготовок

С целью определения точности полученных заготовок были осуществлены замеры разностенности в трёх сечениях по схеме, представленной на рисунке 46. Для корректности проведения измерений от торцов отступали 200 мм, а третье сечение для измерения брали по центру заготовки.

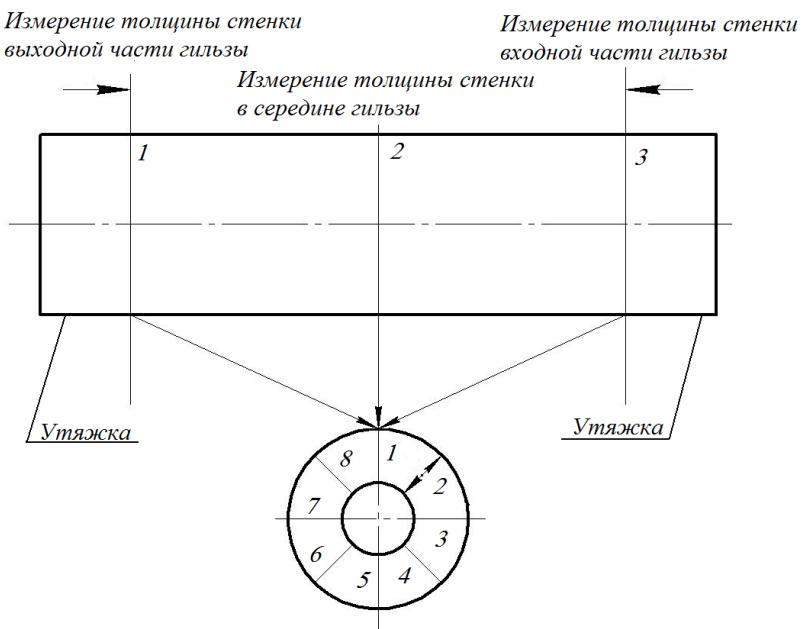


Рисунок 46 - Методика замера толщины стенки

Замеры толщины стенок проводили на каждой заготовке ультразвуковым толщиномером « Взлет ». Результаты замеров приведены в таблице 22:

Таблица 22 – Замеры толщин стенок особотолстостенных труб

| Сечение:       | Толщина стенки |                |                |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Заготовка №1.2 | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | S <sub>3</sub> | S <sub>4</sub> | S <sub>5</sub> | S <sub>6</sub> | S <sub>7</sub> | S <sub>8</sub> |
| №1             | 68,47          | 66,00          | 66,08          | 68,29          | 72,41          | 73,00          | 72,61          | 70,38          |
| №2             | 69,72          | 67,21          | 65,35          | 65,68          | 69,13          | 72,36          | 74,23          | 73,2           |
| №3             | 72,10          | 68,35          | 65,64          | 65,04          | 66,76          | 70,00          | 73,45          | 74,60          |
| Заготовка №1.3 |                |                |                |                |                |                |                |                |
| №1             | 68,10          | 66,8           | 67,70          | 69,68          | 71,51          | 73,82          | 73,00          | 71,84          |
| №2             | 71,20          | 66,60          | 65,85          | 66,02          | 69,25          | 71,00          | 74,34          | 75,00          |
| №3             | 72,02          | 70,87          | 69,88          | 67,33          | 68,06          | 70,20          | 71,80          | 72,77          |
| Заготовка №1.4 |                |                |                |                |                |                |                |                |
| №1             | 70,1           | 69,03          | 67,15          | 68,20          | 71,52          | 71,35          | 71,45          | 71,35          |
| №2             | 74,07          | 71,81          | 67,80          | 66,34          | 68,10          | 71,50          | 73,36          | 74,79          |
| №3             | 74,82          | 75,05          | 72,53          | 69,27          | 65,30          | 66,37          | 69,15          | 72,00          |
| Заготовка №1.5 |                |                |                |                |                |                |                |                |
| №1             | 70,00          | 70,80          | 71,70          | 71,80          | 72,25          | 70,16          | 69,17          | 69,86          |
| №2             | 69,20          | 70,15          | 70,25          | 70,30          | 71,40          | 70,80          | 70,74          | 70,36          |
| №3             | 68,30          | 69,80          | 70,50          | 72,04          | 72,13          | 70,81          | 69,80          | 69,40          |
| Заготовка №1.6 |                |                |                |                |                |                |                |                |
| №1             | 68,46          | 69,47          | 70,82          | 71,46          | 72,54          | 71,07          | 69,05          | 68,07          |
| №2             | 68,80          | 67,68          | 68,52          | 70,69          | 72,76          | 72,06          | 71,25          | 70,51          |
| №3             | 71,04          | 69,86          | 69,57          | 69,81          | 70,75          | 70,32          | 71,76          | 71,84          |

Обработанные результаты представлены в таблице 23. По полученным результатам построена гистограмма распределения разностенности, представленная на рисунке 47 и изменение разностенности по длине заготовок, представленное на рисунке 48.

Таблица 23 – Точность заготовок по толщине стенки

| №, заготовки | Средний диаметр заготовки, D (мм) | Средняя точность заготовка по диаметру, % | Среднее значение толщины стенки заготовка, Scp(мм) | Средняя точность одной заготовки по диаметру, v (%) |
|--------------|-----------------------------------|---|--|---|
| 1.2          | 235                               | 0,53                                      | 70,25  | 0,95  |
| 1.3          | 236                               | 0,43                                      | 70,65  | 2,03  |
| 1.4          | 237                               | 0,80                                      | 70,21  | 1,22  |
| 1.5          | 237                               | 0,67                                      | 70,74  | 1,14  |
| 1.6          | 237                               | 0,62                                      | 70,54  | 1,12  |

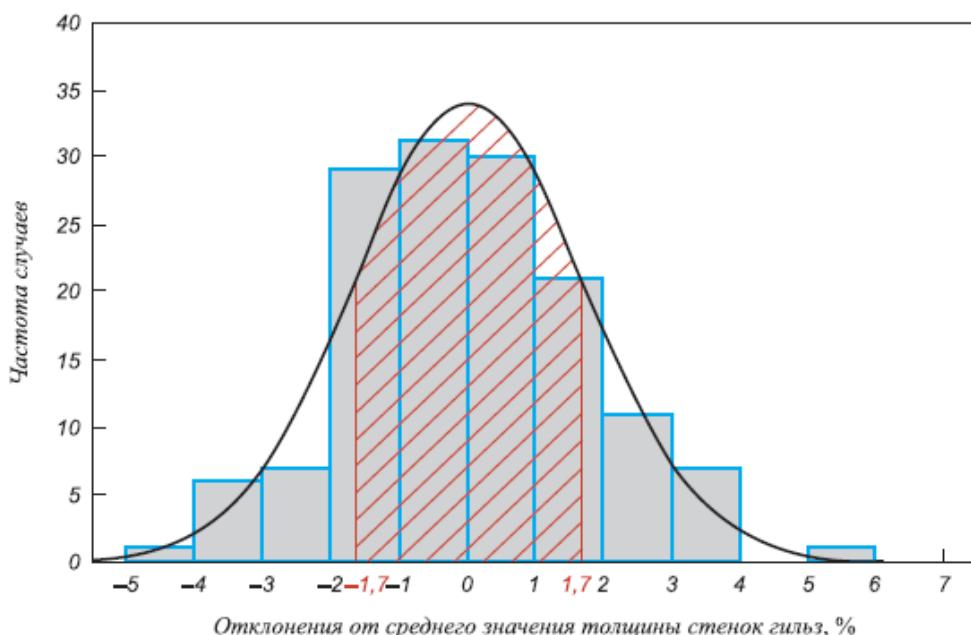


Рисунок 47 - Гистограмма распределения отклонений по толщине стенки заготовок

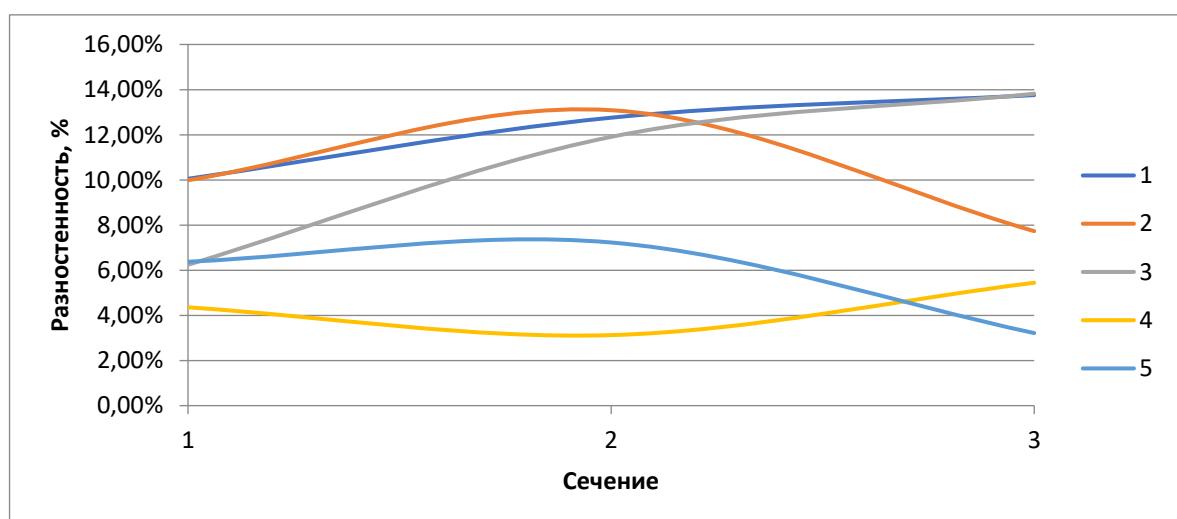


Рисунок 48 - Распределение разностенности прошитых заготовок по сечениям

Основываясь на гистограмме нормального распределения отклонений по толщине стенки можно отметить, что среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  находится в пределах  $\pm 1,7$  мм, а все измеренные значения в пределах  $-5;+6$  мм.

Таблица 24 – Относительное значение отклонений заготовок по диаметру и толщине стенки

| №, заготовки | Средний диаметр заготовок, $D_{i(\text{ср})}$ (мм) | Дисперсия диаметра заготовки, $\sigma_{D_i}^2 \text{мм}^2$ | Среднеквадратичное отклонение |
|--------------|--|--|-------------------------------|
| 1.2          | 235  | 0,23   | 0,48                          |
| 1.3          | 236  | 0,15   | 0,39                          |
| 1.4          | 237  | 0,15   | 0,39                          |
| 1.5          | 237  | 0,05   | 0,21                          |
| 1.6          | 237  | 0,12   | 0,35                          |

#### 4.3 Изготовление черновых и чистовых полых вагонных осей

В качестве оборудования для профилирования полых заготовок использовалась радиально-ковочная машина SXP-55 производства австрийской фирмы GFM, установленная на ПАО «Мотовилихинские заводы» (рисунок 49). В таблице 25 представлены основные характеристики для РКМ SX-55, справедливые и для SXP-55.

Таблица 25 - Основные технические характеристики радиально-ковочной машины SX-55

| SX-55   |   |                                |                               |                              |
|---|---|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Максимальный размер исходной заготовки, мм квадрат/круг | Минимальный размер поковок, мм квадрат/круг | Максимальная длина поковок, мм | Максимальное усилие ковки, МН | Число ударов бойков в минуту |
| 550/500   | 100/100                                     | 10000                          | 10                            | 200                          |



а

б

Рисунок 49 - Внешний вид PKM SXP-55 а- вид со стороны головки В, б – вид со стороны головки А

В качестве рабочего инструмента использовались универсальные бойки с плоской калибрующей частью. Эскиз бойков представлен ниже (рисунок 50).

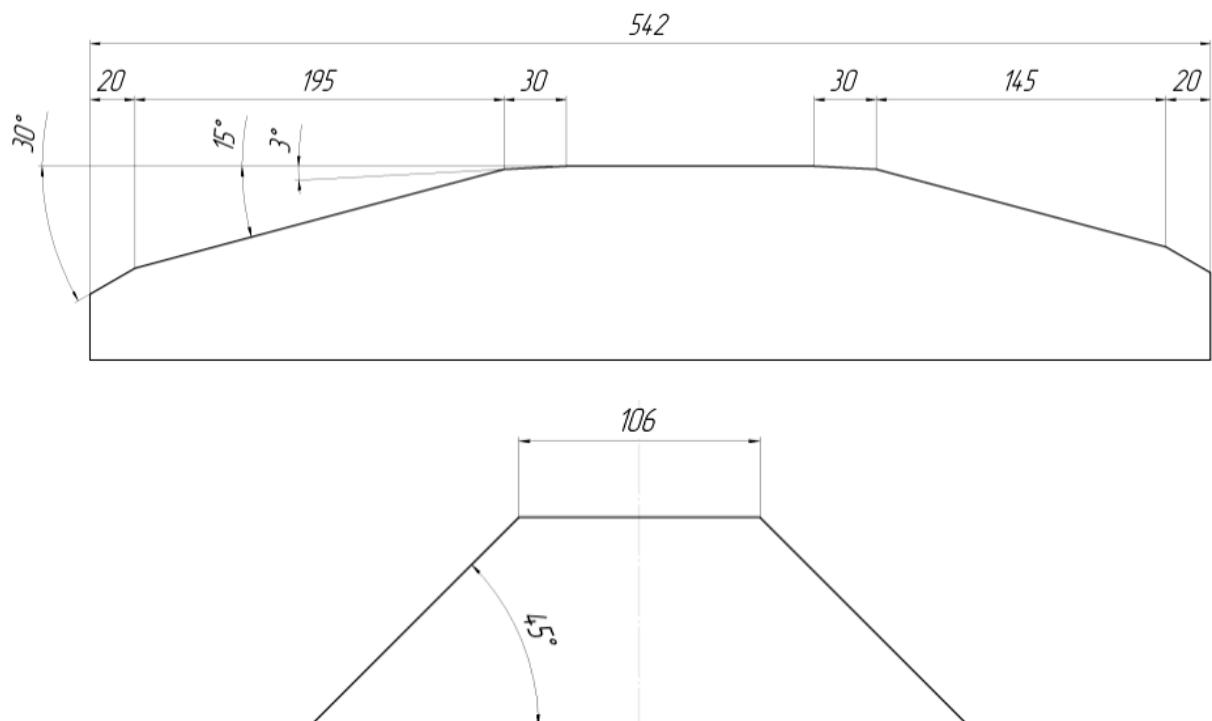


Рисунок 50 - Эскиз рабочих бойков

НИТУ МИСИС, АО ВМЗ и ПАО «Мотовилихинские заводы» были разработаны и согласованы следующие чертежи для оси РУ1Ш, представленные на рисунках 51-52.

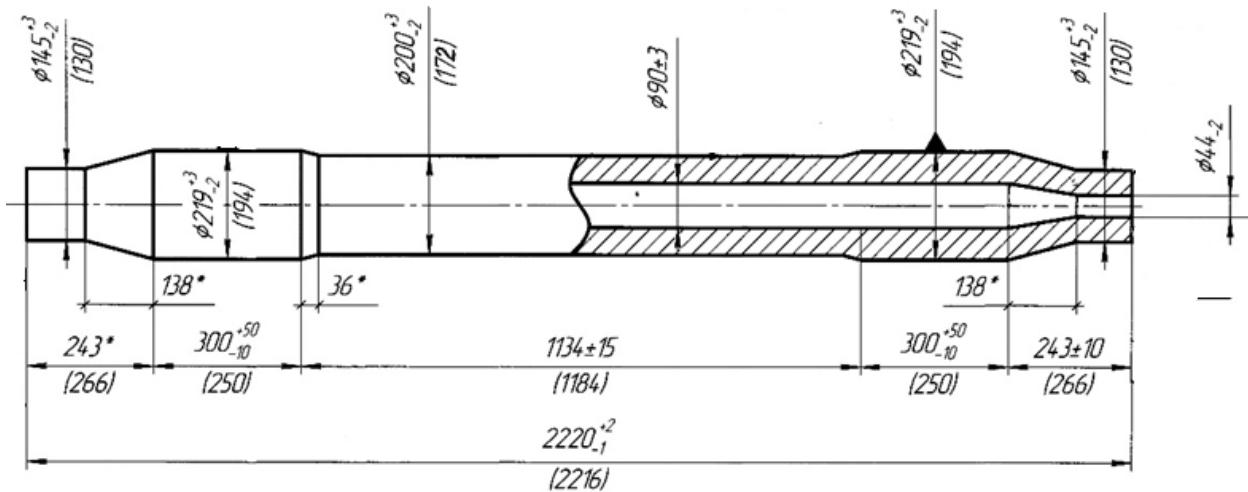


Рисунок 51 - Полая поковка РКП/ОБ.

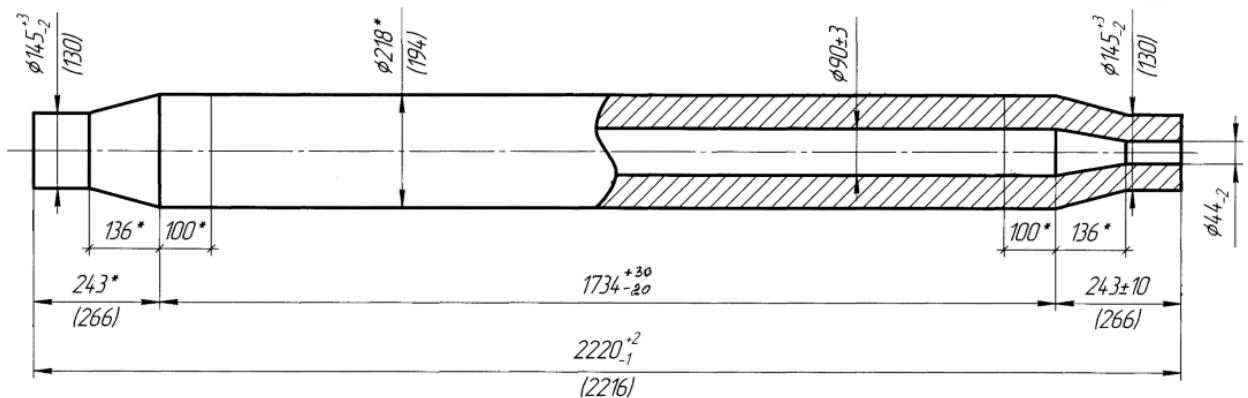


Рисунок 52 - Полая поковка РКП-2/ОБ

В соответствии с разработанными техническими условиями «Черновые полые вагонные оси из прошитых бесшовных особотолстостенных горячекатаных стальных труб. Опытная партия.» на поковке допускается наличие дефектов с глубиной залегания не более 75% от припуска на механическую обработку, а также вмятин от зажимных губок и манипулятора глубиной не более 5 мм. Разностенность не должна превышать 3 мм. По итогам ковки наносят номер плавки и номер поковки, а также клеймо ОТК. Далее проводится контроль механических свойств, макроструктуры. Механические свойства должны соответствовать указанным в таблице 26.

Таблица 26 - Механические свойства черновых полых осей.

| Параметр  | Значение                  |             |
|---|---------------------------|-------------|
| Временное сопротивление при растяжении $\sigma$ Н/мм <sup>2</sup> | 600-620                   | 630 и более |
| Предел текучести $\sigma$ Н/мм <sup>2</sup>                       | не менее                  | 310         |
| Относительное удлинение $\delta$ %                                |                           | 20          |
| Ударная вязкость при 20°C<br>KCU Дж/см <sup>2</sup>               | Среднее значение не менее | 54          |
|   | Минимальное значение      | 39          |
|   |                           | 44          |
|   |                           | 34          |

Требования к механическим свойствам аналогичны требованиям ГОСТ 4728-2010 «Заготовки осевые для железнодорожного подвижного состава».

Проведенную правку всех полученных заготовок производили для уменьшения параметров разностенности и бieniaия. Ковку по чертежу РКП/ОБ осуществляли в два прохода. В первом проходе - обжатие центральной части оси, во втором - происходило формирование шеек.

Полую особотолстостенную заготовку помещали в нагревательную кольцевую печь и нагревали до температуры  $1180\pm25^{\circ}\text{C}$ . После окончания нагрева в заготовку внедряли дORN Ø90 мм и производили ковку средней части до Ø200 мм. После удаления дорна заготовку снова подогревали в кольцевой печи до температуры  $1180\pm25^{\circ}\text{C}$ . После нагрева формировали шейки оси до Ø145 мм на внутреннем вкладыше (дорне) Ø36 мм. Последующий контроль осуществляли по параметрам бieniaия, маркировке, и проводили визуальный контроль поковок.

Ковку по чертежу РКП-2/ОБ осуществляли за один проход, включая формирование шеек оси до Ø145 мм на внутреннем вкладыше (дорне) Ø36 мм. Последующий контроль осуществляли по параметрам бieniaия, маркировке, и проводили визуальный контроль поковок. Полученные черновые оси представлены на рисунке 53.



Рисунок 53 - Черновые оси после ковки и охлаждения.

Замечаний по ковке не было, все операции были проведены в полном объеме. При визуальном контроле на центральных частях всех осей обнаружены вмятины от рычагов машины выгрузки из нагревательной печи.

После ковки черновых полых осей ПАО «Мотовилихинские заводы» была проведена механическая обработка двух из них для изготовления опытных чистовых осей. В качестве заготовок для механической обработки были отобраны по одной оси, изготовленные по чертежам РКП/ОБ (слиток №1.3) и РКП-2/ОБ. Разработанная конструкция оси представлена на рисунке 54. В качестве исходной заготовки для оси РКП/ОБ-1 допускается использование поковок, изготовленных по чертежам РКП/ОБ и РКП-2/ОБ.

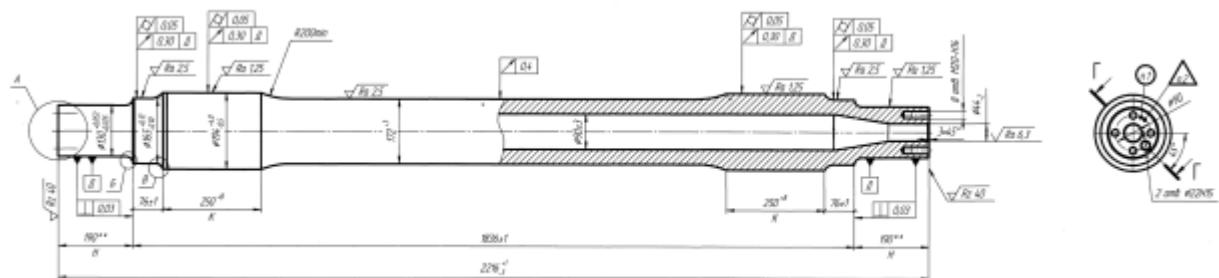


Рисунок 54 - Ось РКП/ОБ-1

Таблица 27 - Размеры черновой оси по чертежу РКП для механической обработки.

|                     | Диаметр                     |                             |                   |                             |                             |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                     | Левой шейки                 | Левой подступичной части    | Центральной части | Правой подступичной части   | Правой шейки                |
| По чертежу          | $\varnothing 145_{-2}^{+3}$ | $\varnothing 219_{-2}^{+3}$ | $\varnothing 208$ | $\varnothing 219_{-2}^{+3}$ | $\varnothing 145_{-2}^{+3}$ |
| По итогам измерений | $\varnothing 146$           | $\varnothing 218$           | $\varnothing 201$ | $\varnothing 218$           | $\varnothing 146$           |
|                     | Длина                       |                             |                   |                             |                             |
|                     | Общая                       | Левой подступичной части    | Центральной части | Правой подступичной части   |                             |
| По чертежу          | $2220_{-1}^{+2}$            | $300_{-10}^{+50}$           | $1134 \pm 15$     | $300_{-10}^{+50}$           |                             |
| По итогам измерений | 3740                        | 330                         | 1125              | 310                         |                             |

Таблица 28 - Размеры черновой оси по чертежу РКП-2 для механической обработки.

|                     | $\varnothing$ левой шейки   | $\varnothing$ центральной части | $\varnothing$ правой шейки  | Общая длина      | Длина центральной части |
|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|
| По чертежу          | $\varnothing 145_{-2}^{+3}$ | $\varnothing 208$               | $\varnothing 145_{-2}^{+3}$ | $2220_{-1}^{+2}$ | $1734_{-20}^{+30}$      |
| По итогам измерений | $\varnothing 146 \div 147$  | $\varnothing 201 \div 206$      | $\varnothing 148$           | 3545             | 1730                    |

Основные операции, выполняемые при механической обработке черновой оси:

- подрезка концевых частей;
- фрезерование торцев;
- черновая токарная обработка по всей длине;

- чистовое фрезерование торцев;
- обработка торцовых резьбовых отверстий;
- шлифование шеек и предподстуничных частей;
- выходной размерный геометрический ультразвуковой и магнитопорошковый контроль.

Чистовые оси, изготовленные из заготовок по чертежам РКП и РКП-2, соответствуют по геометрическим размерам разработанному и согласованному чертежу чистовой оси РКП/ОБ-1 (рисунок 55).

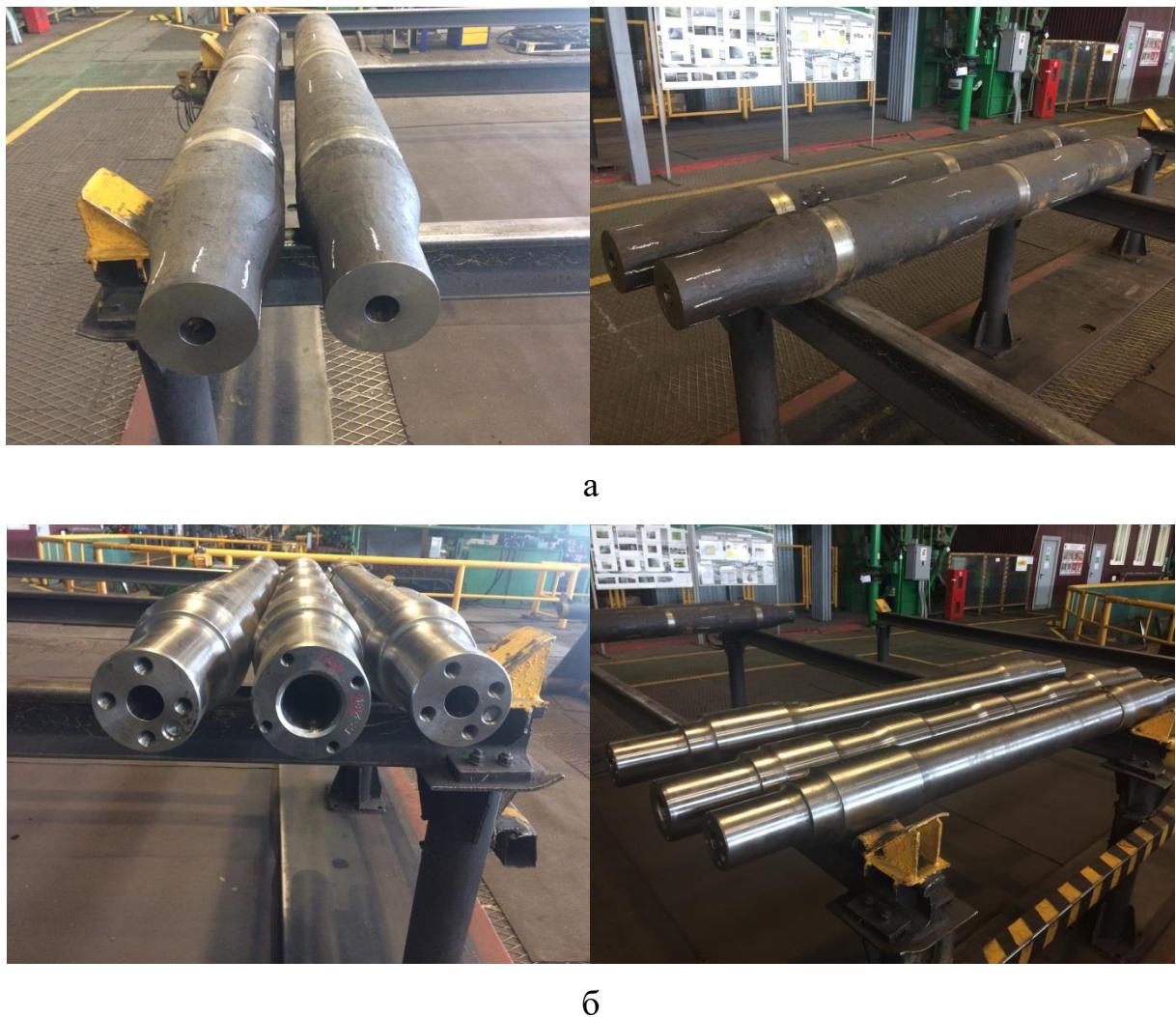


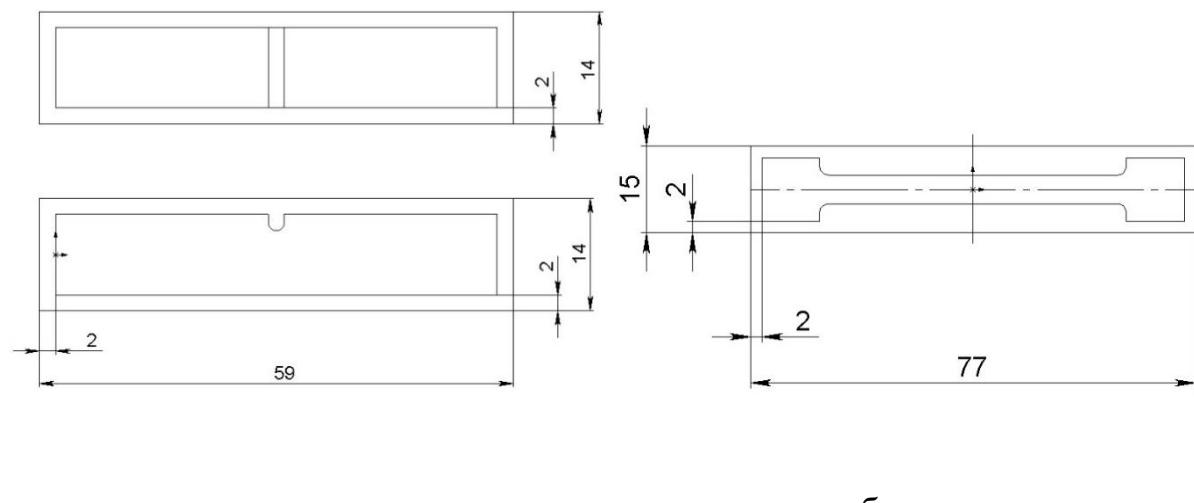
Рисунок 55 - Изготовленные черновые (а) и чистовые (б) оси

#### 4.4 Исследование механических свойств металла осей на различных этапах производственного цикла

Для изучения влияния предварительной деформации на свойства осевых заготовок изготовлены образцы на статический изгиб и на растяжение, вырезанные из исходной осевой заготовки, прошитой заготовки и из готовой оси.

Образцы для механических испытаний были изготовлены в осевом направлении. Это обусловлено тем, что в соответствии с ГОСТ 33200-2014 механическим испытаниям подвергаются только образцы в осевом направлении, отобранные из шейки или подступичной части черновой оси.

Для получения объективных результатов механических свойств образцы отбирали посередине исходной и прошитой заготовок, где процесс деформации был устойчивым, а также из подступичной части полой вагонной оси. Размеры и тип образцов для испытаний на ударную вязкость и растяжение были унифицированы для всех трёх случаев вырезки. Геометрические размеры данных образцов представлены на рисунке 56.



а – образец для растяжения, б – образец для удара

Рисунок 56 - Образцы для мехиспытаний с припуском на мехобработку

На рисунке 57 показаны места деления исходной заготовки, прошитой заготовки и черновой вагонной оси для вырезки образцов для механических испытаний.

Вырезка проб, заготовок и образцов осуществлялась согласно ГОСТ 7564-97 (Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок, и образцов для механических и технологических испытаний).

Образцы для механических испытаний изготовлены в соответствии с ГОСТ 1497-84 (Металлы. Методы испытаний на растяжение) и ГОСТ 9454-78 (Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатных и повышенных температурах).

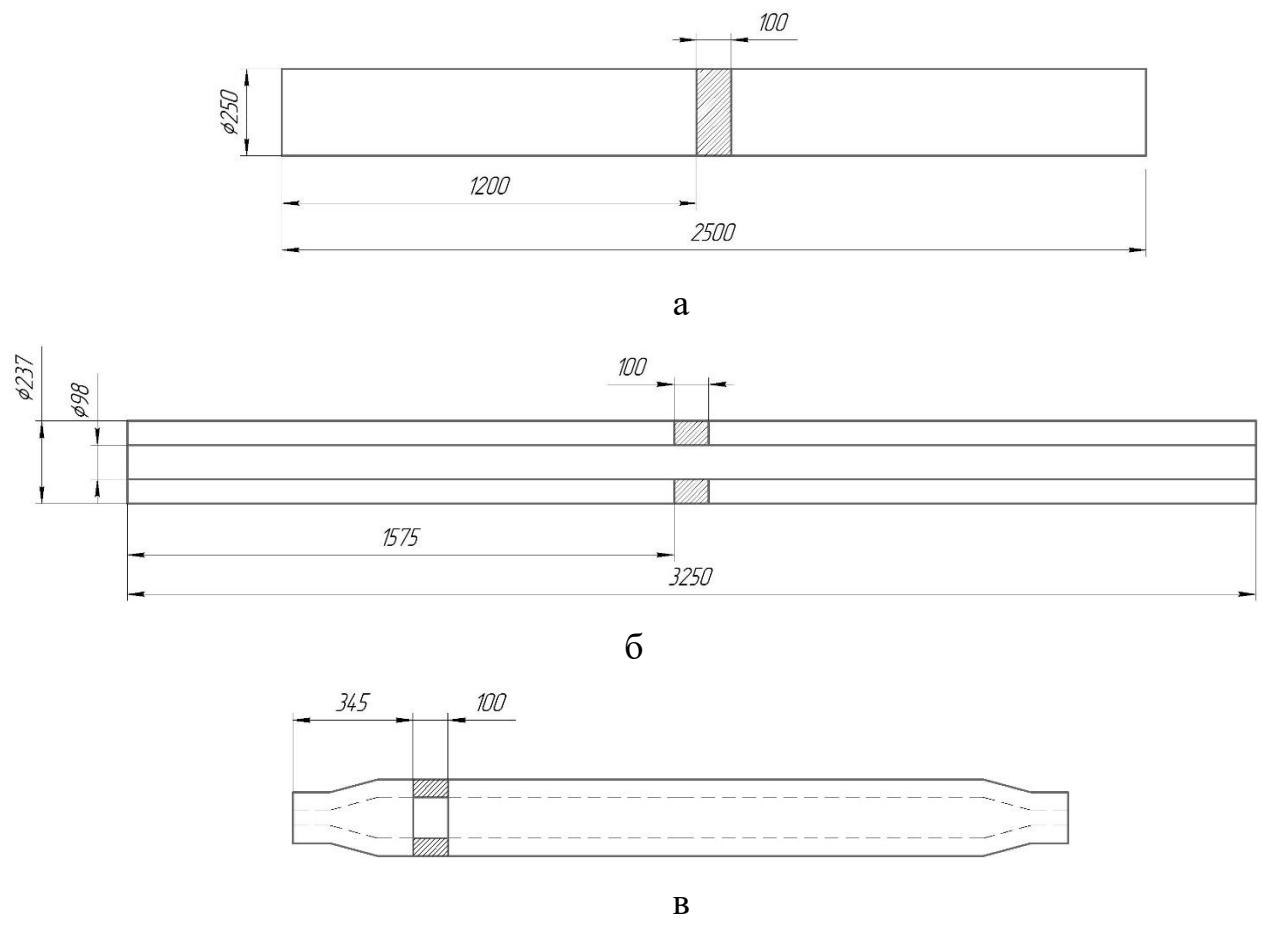


Рисунок 57 - Места деления заготовки для вырезки образцов исходной заготовки (а), прошитой заготовки (б) и черновой оси (в)

После вырезки на образцы для механических испытаний нанесена маркировка X-Y-Z, где X – тип изделия, из которого вырезан образец, Y – тип проводимого испытания, Z – положение образца относительно поверхности изделия.

Из исходной заготовки вырезали по 4 образца каждого типа в соответствии со схемой, представленной на рисунке 58. Расстояние между образцами одинаковое и составляло 56 мм.

Их прошитой заготовки и черновой полой вагонной оси вырезали по 3 образца каждого типа. Схема вырезки представлена на рисунке 59. Расстояние между образцами прошитой заготовки составило 40 мм, а между образцами черновой оси – 38 мм. Также заготовки для изготовления образцов для испытаний на ударную вязкость использовались с целью оценки микроструктуры.

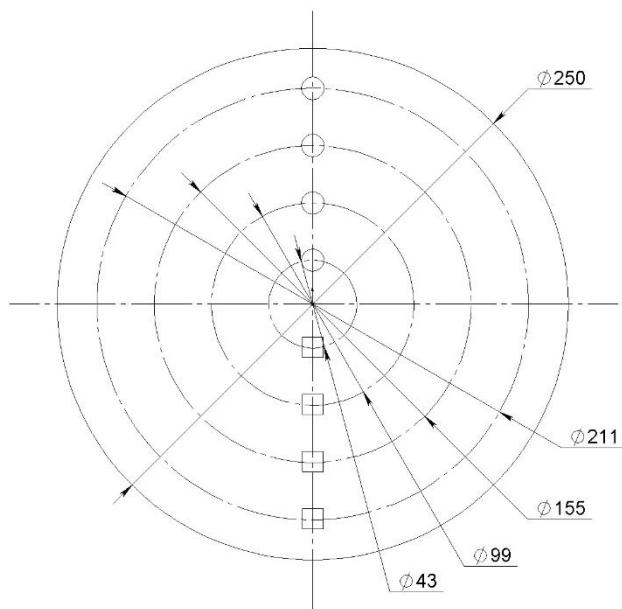


Рисунок 58 - Схема вырезки образцов из исходной заготовки

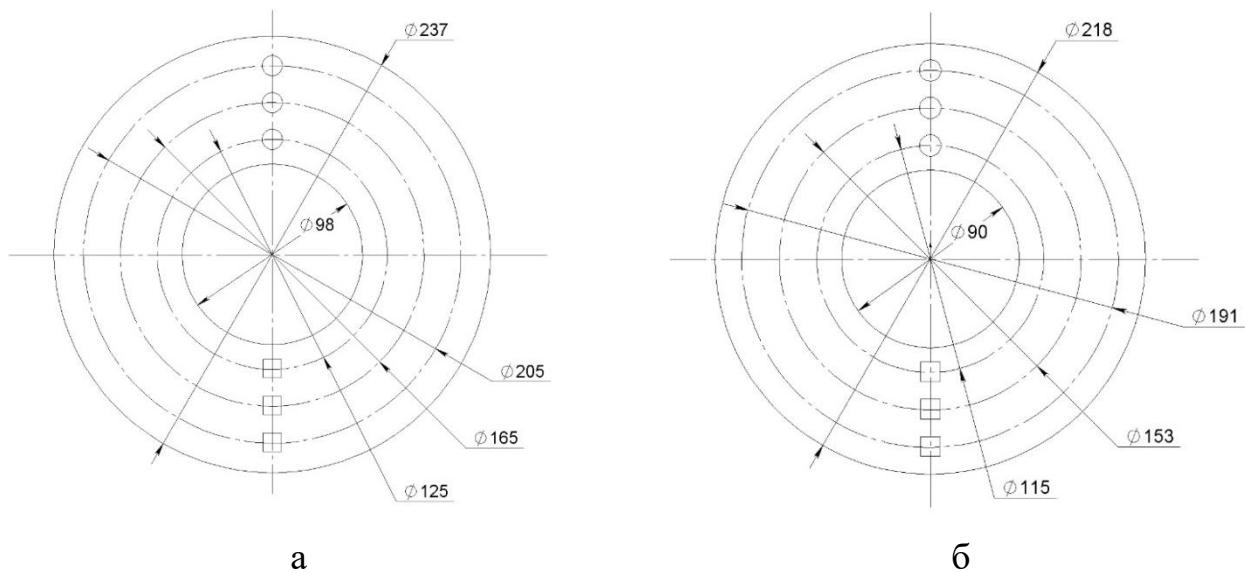


Рисунок 59 - Схема вырезки образцов из прошитой заготовки (а) и черновой оси (б)

По результатам механических испытаний были получены значения предела текучести, предела прочности, относительного удлинения и ударной вязкости для исходной заготовки, прошитой заготовки и черновой полой оси. Для удобства сравнения брали средние значения испытаний для 2 и 3 образцов из исходной заготовки и сравнивали с результатами 2-ого образца из прошитой заготовки и черновой оси. Таким образом были получены результаты для трёх слоёв – наружного, среднего и центрального, представленные в таблицах 29-31.

Таблица 29 - Результаты испытаний. Исходная заготовка.

|          | Предел текучести (MPa) | Предел прочности (MPa) | Относительное удлинение (%) | Ударная вязкость КСУ |         |             |
|----------|------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------|---------|-------------|
|          |                        |                        |                             | Испытания            | среднее | минимальное |
| Наружн.  | 283,08                 | 558,67                 | 39,9                        | 66                   | 63,33   | 61          |
| Средн.   | 284,73                 | 564,57                 | 36,82                       | 61                   |         |             |
| Центр.   | 279,86                 | 570,2                  | 40,17                       | 63                   |         |             |
| $\Sigma$ | 282,56                 | 564,48                 | 38,96                       |                      |         |             |

Таблица 30 - Результаты испытаний. Прошитая заготовка.

|          | Предел текучести (MPa) | Предел прочности (MPa) | Относительное удлинение (%) | Ударная вязкость КСУ |         |             |
|----------|------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------|---------|-------------|
|          |                        |                        |                             | Испытание            | среднее | минимальное |
| Наружн.  | 313,35                 | 615,58                 | 42,08                       | 72                   |         |             |
| Средн.   | 295,92                 | 607,22                 | 43,43                       | 73                   |         |             |
| Центр.   | 324,63                 | 636,22                 | 40,36                       | 71                   |         |             |
| $\Sigma$ | 313,3                  | 619,66                 | 41,96                       |                      |         |             |

Таблица 31 - Результаты испытаний. Черновая ось.

|          | Предел текучести (MPa) | Предел прочности (MPa) | Относительное удлинение (%) | Ударная вязкость КСУ |         |             |
|----------|------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------|---------|-------------|
|          |                        |                        |                             | Испытание            | среднее | минимальное |
| Наружн.  | 354,48                 | 649,17                 | 35,69                       | 62                   |         |             |
| Средн.   | 351,28                 | 650,14                 | 34,33                       | 64                   |         |             |
| Центр.   | 353,99                 | 655,31                 | 35,19                       | 57                   |         |             |
| $\Sigma$ | 353,25                 | 651,54                 | 35,07                       |                      |         |             |

Важно отметить, что после технологической операции прошивки возрастают уровень как прочностных, так и пластических механических свойств. Это можно отметить, сравнивая результаты механических испытаний исходной заготовки с требованиями ГОСТ 4828-2010 для осевой заготовки и результаты механических испытаний черновой оси с требованиями ГОСТ 33200-2014. Результаты этих сравнений, а также изменение механических свойств исходной заготовки и черновой оси представлены в таблицах 32-33.

Таблица 32 - Исходная заготовка в сравнении с ГОСТ

|                | Предел прочности (MPa) | Относительное удлинение (%) | Ударная вязкость КСУ |             |
|----------------|------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------|
|                |                        |                             | среднее              | минимальное |
| ГОСТ 4728-2010 | 580                    | 20                          | 49                   | 34          |
| Наружн.        | -3,68%                 | +99,50%                     |                      |             |
| Средн.         | -2,66%                 | +84,08%                     | +29,25%              | +79,41%     |
| Центр.         | -1,69%                 | +100,85%                    |                      |             |
| Среднее        | -2,68%                 | +94,81%                     |                      |             |

Таблица 33 - Черновая ось в сравнении с ГОСТ

|                 | Предел текучести (MPa) | Предел прочности (MPa) | Относительное удлинение (%) | Ударная вязкость KСU |             |
|-----------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------|
|                 |                        |                        |                             | среднее              | минимальное |
| ГОСТ 33200-2014 | 325                    | 650                    | 18                          | 34                   | 29          |
| Наружн.         | +9,07%                 | -0,13%                 | +98,28%                     | +79,41%              | +96,55%     |
| Средн.          | +8,09%                 | +0,02%                 | +90,72%                     |                      |             |
| Центр.          | +8,92%                 | +0,82%                 | +95,50%                     |                      |             |
| Среднее         | +8,69%                 | +0,24%                 | +94,83%                     |                      |             |

По вышеприведённым таблицам показано, что заготовка и черновая ось полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ, а по параметрам ударной вязкости и относительному удлинению их значительно превосходят. Так, средняя ударная вязкость для заготовки превышала требования в 1,29 раза, для черновой оси – в 1,79 раза, а относительное удлинение и для заготовки, и для черновой оси оказалось выше требований ГОСТ в 1,94 раза.

Также изменение выявлено и при анализе макроструктуры металла заготовки и готовой оси. Для всех образцов характерна ферритно-перлитная структура. Изображения микроструктуры приведены на рисунках 60 и 61.

Таким образом, проведя механические испытания, было показано положительное влияние винтовой прошивки на механические свойства полых вагонных осей, изготовленных по разрабатываемой технологии.

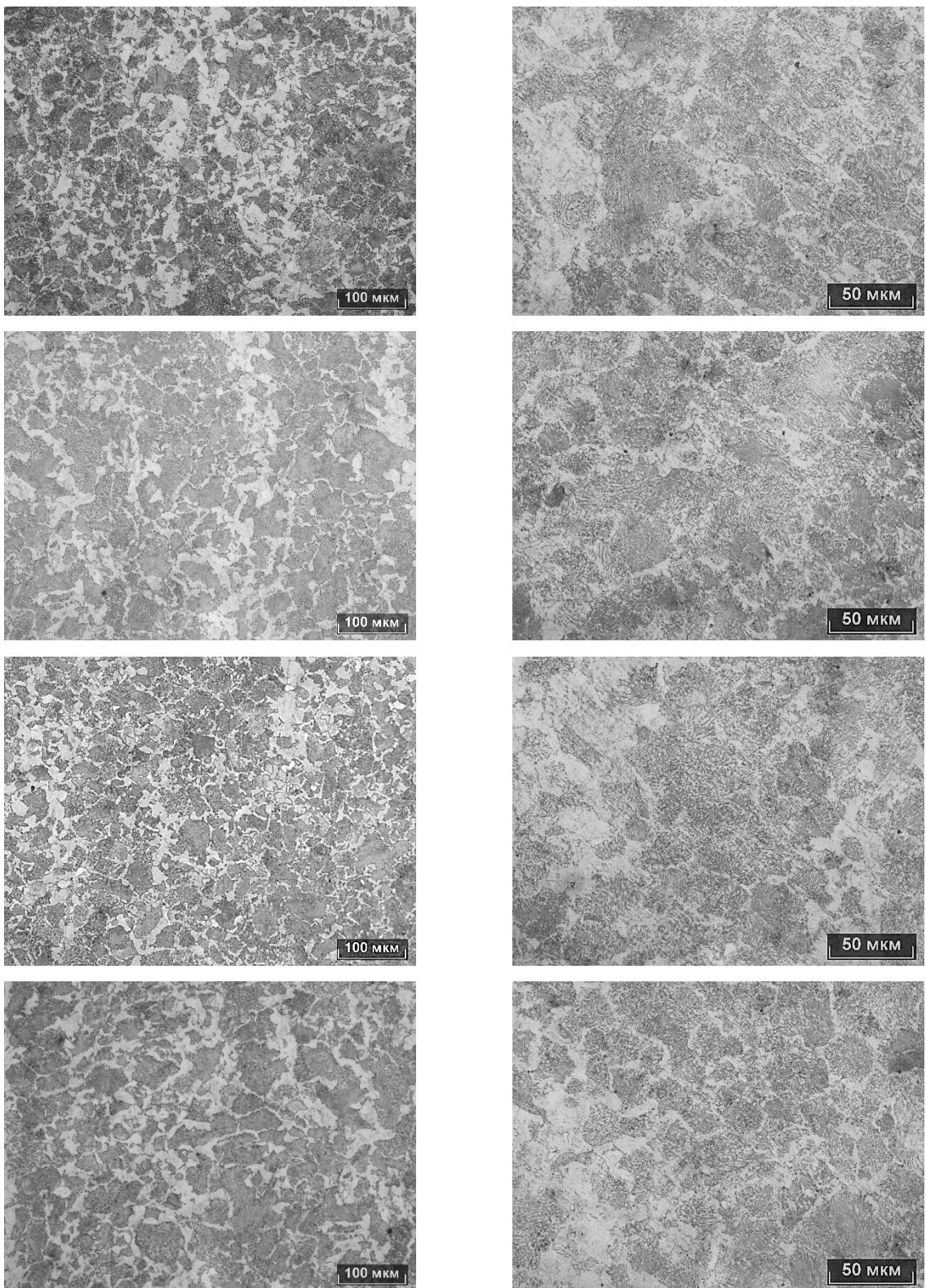


Рисунок 60 – Микроструктура кованой заготовки

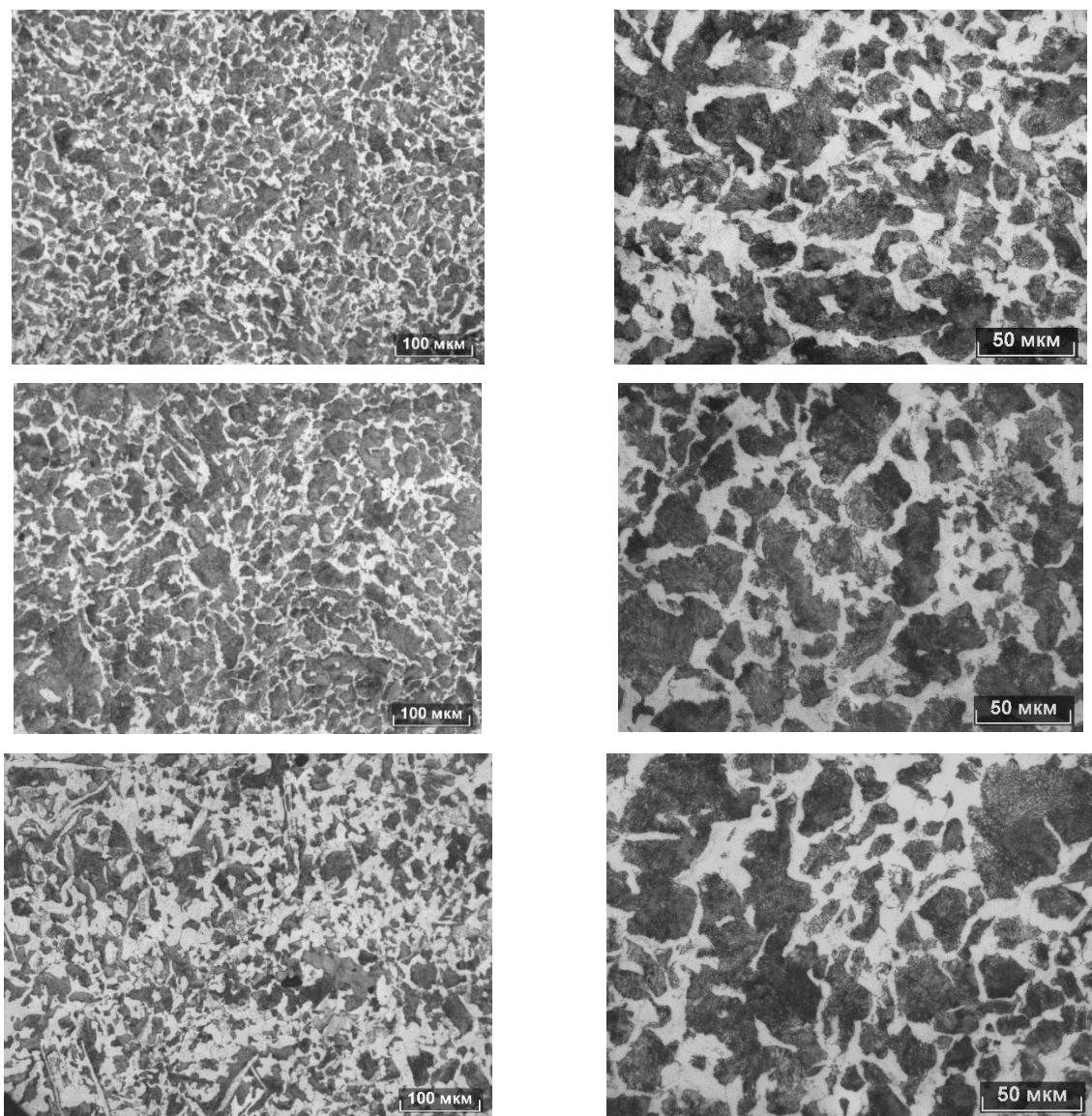


Рисунок 61 – Микроструктура черновой оси

При производстве кованых заготовок и черновых вагонных осей на ПАО «Мотовилихинские заводы» также был проведён контроль макроструктуры и неметаллических включений. Макроструктура контролировалась в соответствии с ГОСТ 10243-75. В кованых заготовках была обнаружена центральная пористость 0,5 балла (при требовании не более 3), в готовых осях – точечная неоднородность 0,5 бала (при требовании не более 3). Данные по неметаллическим включениям представлены в таблице 34.

Таблица 34 - Неметаллические включения

| Тип и условное обозначение неметаллических включений | Результаты исследований заготовки | Для заготовки ГОСТ 4728-2010 | Результаты исследований черновой оси | Для черновых осей ГОСТ 33200-2014 |
|--|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Сульфиды (С)   | 1,1                               | 2,5                          | 0,7                                  | 2,5                               |
| Оксиды строчечные (ОС)                               | 0                                 | 2,5                          | 0                                    | 2,5                               |
| Силикаты пластичные (СП)                             | 0                                 | 2,5                          | 0                                    | 2,5                               |
| Силикаты хрупкие (СХ)                                | 0,9                               | 2,5                          | 0,9                                  | 2,5                               |
| Силикаты недеформирующиеся (СН)                      | 1,9                               | 2,5                          | 1,3                                  | 2,5                               |

Результаты исследований свойств металла осей показывают его высокое качество, как с точки зрения структуры, так и по уровню механических свойств. Исходя из уровня загрязнённости неметаллическими включениями, полученные полые оси соответствуют категории А по ГОСТ 33200-2014.

#### **4.5 Технические предложения по внедрению разработанной технологии**

Учитывая различные технологии и оборудование для получения вагонных осей: горячая обработка металлов давлением и холодная механическая обработка - технологическое производство полых осей целесообразно проектировать по участкам. Были разработаны технические предложения на проектирование производства полых вагонных осей, состоящее из следующих участков:

- участок производства полой осевой заготовки (на ТПА 70-270 – прошивка/раскатка, калибровка)

- участок производства полой черновой оси (нагрев, профилирование на РКМ, нормализация)

- участок производства чистовых осей (механическая обработка черновой оси). Также возможна кооперация с другими производствами для данного этапа.

Участок производства полой заготовки для вагонных осей на ТПА 70-270

Основные технологические операции:

1. Контроль заготовки
2. Резка круглой заготовки на мерные длины
3. Зацентровка
4. Нагрев в печи с шагающими балками
5. Для оси РУ1Ш прошивка осуществляется на большем диаметре оправки, а раскатка – на меньшем диаметре\*
6. Калибровка и правка
7. Охлаждение
8. Складирование

Компоновка оборудования

Основное оборудование участка (рисунок 62):

1. Газовая печь с шагающими балками
2. Прошивно-раскатной стан
3. Калибровочный стан
4. Холодильник
5. Склад осевых заготовок

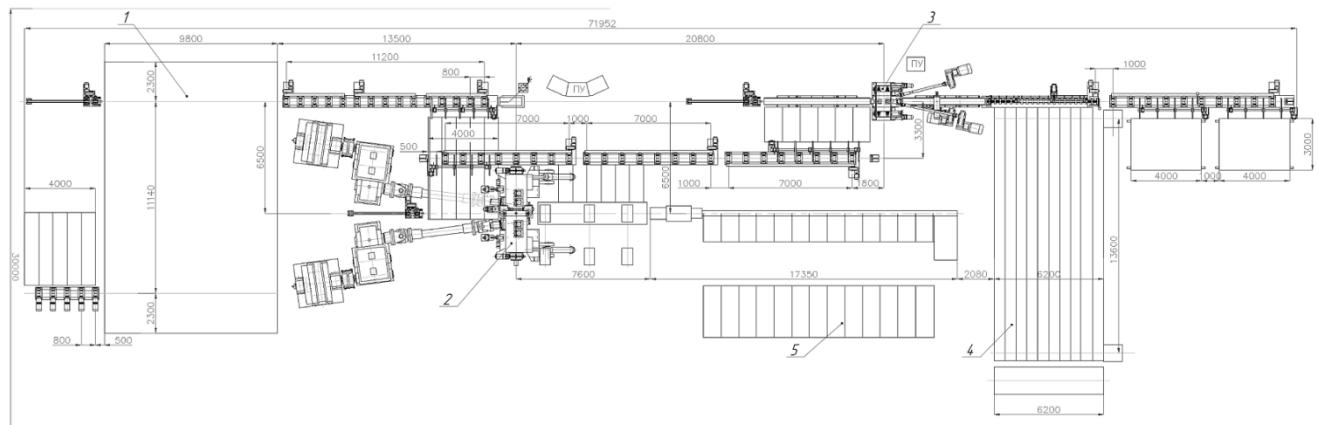


Рисунок 62 - Компоновка участка производства полых осевых заготовок

## Участок производства черновых полых осей

## Основные технологические операции:

Перечень основных технологических операций для производства полых черновых осей состоит из следующих пунктов:

1. Контроль полой осевой заготовки
  2. Нагрев полой заготовки в кольцевой нагревательной печи
  3. Выдача нагретой заготовки и её передача в манипулятор
  4. Ковка на ступенчатой оправке
  5. Охлаждение поковки в течение 24 часов
  6. Термическая обработка черновых осей в печи для нормализации
  7. Правка осей
  8. Охлаждение нормализованных осей на воздухе
  9. Передача на механическую обработку

## Компоновка оборудования

Состав оборудования участка (рисунок 63):

1. Кольцевая нагревательная печь
  2. Радиально-ковочная машина с двумя манипуляторами
  3. Печь для нормализации черновых полых вагонных осей

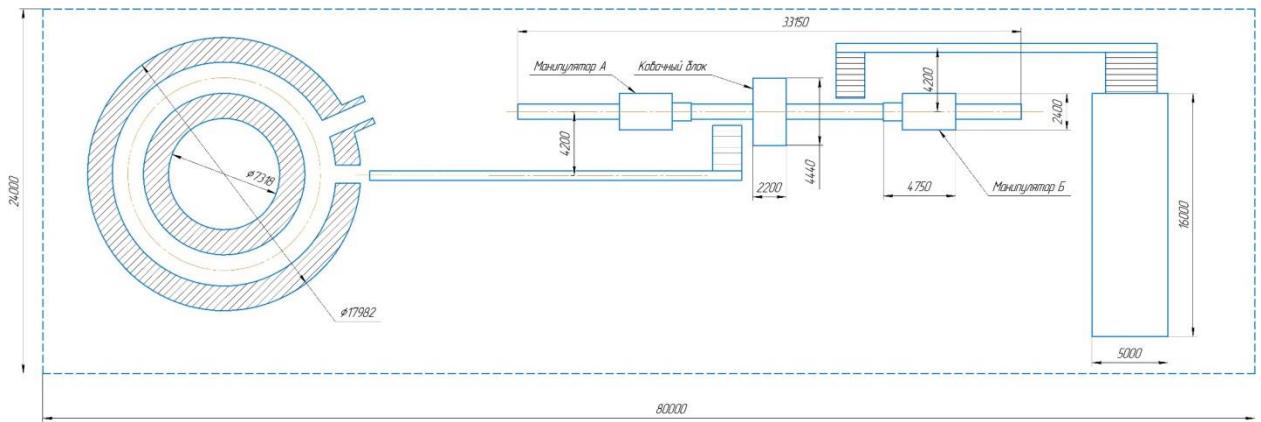


Рисунок 63 - Компоновка участка производства черновой полой оси

Механическая обработка черновых осей может быть организована на сторонних предприятиях.

## **Основные выводы по работе**

1. Проведён анализ литературы и актуальных направлений исследований по теме диссертации. Представлены методы обработки металлов давлением, применяемые при производстве вагонных осей. Приведена классификация способов получения центрального отверстия в заготовке. Предложена следующая последовательность технологических операций для производства полых вагонных осей: ковка НЛЗ с уковом не менее 3, получение центрального отверстия методом винтовой прошивки, профилирование полой осевой заготовки, выполнение термической и механической обработки.

2. Экспериментальные исследования процесса прошивки заготовок из стали ОС диаметром 90 мм в гильзы размером DxS=85x28 мм, 85x25 мм и 85x22 мм на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д показали возможность получения особотолстостенных полых заготовок с разностенностью менее 8-10%; при этом установлены наиболее значимые факторы – угол подачи рабочих валков и коэффициент вытяжки, определяющие точность полученных заготовок.

3. Рассчитана нагрузка на оправочный стержень при прошивке особотолстостенных заготовок по методике предложенной НИТУ МИСиС. Проведено моделирование деформации оправочного стержня прошивного-раскатного стана ТПА 70-270 при расчётной нагрузке 458 кН для прошивки осевых заготовок и показана возможность получения особотолстостенных полых заготовок при существующей компоновке оборудования выходной стороны.

4. Анализ результатов компьютерного моделирования прошивки осевых заготовок позволил выявить влияние угла подачи на напряжённо-деформированное состояние заготовки в очаге деформации. На основе анализа параметра интенсивности конечных деформаций установлено, что проработка структуры заготовки при углах подачи  $6^\circ$  и  $12^\circ$  отличается незначительно, однако распределение параметров интенсивности напряжений, интенсивности

скоростей деформаций и интенсивности конечных деформаций более равномерно при угле подачи в  $6^\circ$ , что, предположительно, позволяет получить более однородную проработку заготовки.

5. Осуществлено апробирование технологического процесса производства полых вагонных осей на основе РУ1Ш в условиях ПАО «Мотовилихинские заводы», состоящего из следующих этапов: ковка исходной непрерывнолитой заготовки 540x480 мм на РКМ SXP-55 до диаметра 250 мм для винтовой прокатки; изготовление особотолстостенных осевых полых заготовок с  $D \times S = 237 \times 70$  мм прошивкой на ТПА 70-270 АО ВМЗ; ковка полых осевых заготовок на ПАО «Мотовилихинские заводы» по разработанным картам ковки. Режимы термической и механической обработки не корректировались в сравнении с технологией производства сплошных осей. Показано, что оси, полученные из полых заготовок, прошитых на стане винтовой прокатки вместо сверления, имеют высокие механические свойства, удовлетворяющие требованиям стандартов.

## **Список использованных источников**

1. Заинтересованность рынка в инновационных вагонах будет расти, но нельзя стимулировать ее силой [В сети интернет, доступно: 30.05.2024] <https://www.sg-trans.ru/press/publications/2021/350/>
2. Соколов А.М., Орлова А.М., Романов А.В., Наркизова Е.А., Семенов Е.Ю. Эффективность эксплуатации вагонов с повышенной осевой нагрузкой // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2018. №1 (74), с. 62-65
3. Шадур Л. А., Челноков И. И., Никольский Л. Н. и другие. Вагоны: Учебник для вузов ж.-д. трансп. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1980. — 439 с.
4. Пастухов, И. Ф. Пигунов В. В., Кошкалда Р. О. Конструкция вагонов : учебник — Москва : , 2000. — 504 с.
5. Саакян Ю. З., Савчук В. Б., Поликарпов А. А. и другие. Мировой рынок железнодорожного машиностроения 2019/2020. Аналитический обзор. — М.: ИПЕМ, 2021. — 144 с.
6. Самаркина И. К., Мойкин Д. А., Федорова В. И. Изготовление и ремонт колесных пар, буксовых узлов : учебное пособие — Санкт-Петербург : ПГУПС, 2021. — 76 с
7. Воробьев А. А. Прогнозирование ресурса и совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава : автореф. дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.07 - СПб. : ПГУПС, 2018. - 32 с.
8. Состояние вагоноремонтной отрасли России. Итоги 2020 года : аналит. обзор, [В сети интернет, доступно: 30.05.2024] <https://infoline.spb.ru/upload/iblock/eb0/eb0d084ce5530f060e50d645b7097d23.pdf>
9. Способ изготовления поковок осей для подвижного состава и устройство для его осуществления // Патент России № 2304483С2, 20.08.2007 / Закиров Р.А.

10. Соломенников, А. А. Технология производства и ремонта подвижного состава : курс лекций : Ч. 1 : Несамоходный подвижной состав (Вагоны). – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 205 с.
11. Герасимов В. С., Скиба И. Ф., Кернич Б. М. и другие. Технология вагоностроения и ремонта вагонов: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1988. – 381 с.
12. Паламарь Д.Г., Раздобреев В.Г., Бадюк С.И. Анализ состояния сортопрокатного производства на металлургических предприятиях Украины. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии, - 2011- №23 – С. 185–194.
13. Шор Э.Р. Новые процессы прокатки. - М.: Металлургиздат, 1960. - 386 с
14. Литвинов, З. Ковка вагонных осей / кузнец З. Литвинов. - Москва, 1937
15. Семенов, В.И. Ковка и горячая штамповка - М.: МГИУ, 2011 - 414 с.
16. Тюрин В. А., Лазоркин В. А., Поспелов И. А. и другие. Ковка на радиально-обжимных машинах. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с
17. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для вузов - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. - 560 с
18. Романенко В. П., Манько А. И., Степанов П. П. и другие. Перспективная технология получения полых вагонных осей на основе винтовой прошивки // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 2. – с.28-34
19. Каргин В. Р., Каргин Б.В., Арыщенский Е.В. Теория и технология ковки: учебное пособие. – Самара: Издательство Самарского университета, 2021 – 144 с
20. Погорильчук Е. А., Власов Е. А. Определение оптимальных параметров технологического процесса радиальной ковки // Машиностроение и компьютерные технологии. - 2009. - №9. - с.3

21. Дмитриева А. Я. Прогнозирование механических свойств изделия после холодной радиальной ковки по результатам конечно-элементного моделирования // Известия вузов. Машиностроение. - 2011. - №7. - с.31-37
22. Петренко Ю. П., Мюнх В. Ф., Богатов А. А. и другие. Анализ влияния технологических схем деформации на качество осевого металла ОАО НТМК // Металлург. – 2009. – № 10. – с.55-57
23. Целиков А. И. Непрерывные процессы в металлургии и машиностроении // "В мире науки" (Scientific American). – 1983 - №12. - с. 58
24. Грабовский Г. Г., Корбут В. Б., Иевлев Н. Г. Автоматизированное управление осепрокатным станом // Металл и литье Украины – 2015 - № 1 (260). - с.28-31
25. Wang, J, Shu, X, Xu, H, Ye, C, Xia, Y, & Zhang, S. Research on Variation Law of Rolling Force of Three-Roll Skew Rolling Hollow Axle. Proceedings of the ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 2A: Advanced Manufacturing. Columbus, Ohio, USA. October 30–November 3, 2022.
26. Pater Z, Lis K, Walczuk-Gągała P. Numerical Analysis of the Cross-Wedge of a Hollow Rail Axle. // Advances in Science and Technology Research Journal. 2020, Vol.14, No.1, pp.145-153
27. Lin, Lou, B. Y. Wang, J P Liu, Z H Zheng and C B Zhu. An application exploration of flexible skew rolling a rail car axle. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1270, 2022
28. Рубцов В. Ю., Шевченко О. И. Обзор зарубежных исследований в области поперечно-винтовой прокатки при производстве стальных мелющих шаров и осесимметричных деталей. // Калибровочное бюро. - 2019 - №15 - с.24-36.
29. Кожевникова Г. В., Рудович А. О., Пилипчук Г. П. и другие Прогрессивный метод изготовления черновых вагонных осей // Техника железных дорог. – 2017 - №4. – с.57-63

30. Pater, Z., & Tomczak, J. A new cross wedge rolling process for producing rail axles. // MATEC Web Conf. 190, 11006 (2018)
31. ГОСТ 4728-2010. Заготовки осевые для железнодорожного подвижного состава. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов. 2010
32. ГОСТ 31334-2007. Оси для подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов. 2007
33. ГОСТ 33200-2014. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов. 2014
34. Левченко Г. В., Балаханова Т. В., Нефедьева Е. Е. Обеспечение качества железнодорожных осей, изготовленных из непрерывнолитых заготовок различного сечения // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2016. - № 1. - С. 29-33
35. Богатов А. А. Разработка технического предложения по изготовлению полой оси вагонной тележки // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении.—Екатеринбург, 2012. – 2012, с.638-641
36. Makino T., Sakai H., Kozuka C., Yamazaki Y., Yamamoto M., Minoshima K. Overview of fatigue damage evaluation rule for railway axles in Japan and fatigue property of railway axle made of medium carbon steel // International Journal of Fatigue, 2020, Volume 132
37. Zhang, J., Zhang, J., Yang, B., & Li, X. Very high-cycle fatigue properties and residual stress relaxation of micro-shot-peened EA4T axle steel. // Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, Vol. 28, No. 10, pp.6407-6417.
38. Xu, Z. W., Wu, S. C., & Wang, X. S. Fatigue evaluation for high-speed railway axles with surface scratch. // International Journal of Fatigue, 2019, Vol. 123, pp. 79-86.
39. Dlhý, P., Poduška, J., Pokorný, P., Jambor, M., Náhlík, L., Kajánek, D., Hutař, P. Estimation of residual stress distribution in railway axles. // Engineering Failure Analysis, 2022, Vol. 135

40. Hannemann, R., Köster, P., & Sander, M. Fatigue crack growth in wheelset axles under bending and torsional loading. // International Journal of Fatigue, 2019, Vol. 118, pp. 262-270.
41. Pokorný, P., Vojtek, T., Náhlík, L., & Hutař, P. Crack closure in near-threshold fatigue crack propagation in railway axle steel EA4T. // Engineering Fracture Mechanics, 2017, Vol. 185, pp. 2-19.
42. Hu, Y., Wu, S., Withers, P. J., Cao, H., Chen, P., Zhang, Y., Hutař, P. Corrosion fatigue lifetime assessment of high-speed railway axle EA4T steel with artificial scratch. // Engineering Fracture Mechanics, 2021, Vol. 245
43. Beretta S., Lo Conte A., Rudlin J., & Panggabean D. From atmospheric corrosive attack to crack propagation for A1N railway axles steel under fatigue: Damage process and detection. // Engineering Failure Analysis, 2015, Vol. 47(PB), pp. 252-264.
44. Moretti F., Beretta S., Conte A. L., & Straub D. Corrosion-fatigue under rainwater of a q&t steel: Experiments and probabilistic description. // Paper presented at the Procedia Engineering, 2014, Vol. 74, pp. 12-17.
45. Beretta S., & Conte A. L. New insight into the fatigue-atmospheric corrosion process of A1N steel for railway axles. // 19th European Conference on Fracture: Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety, ECF 2012.
46. Carboni M., Beretta S., & Conte A. L. Research on corrosion fatigue of railway axles. // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2011, Vol. 53, pp. 361-367.
47. Панченко А.И., Кийко С.Г., Гасик М.И. и другие. Современные технологии выплавки и разливки стали EA1N для производства железнодорожных осей // Современная электрометаллургия – 2019 - № 2 - с. 35-42
48. Гасик М. И., Сальников А. С., Пересаденко О. В., Лоза В. В. Разработка и промышленное освоение технологии производства кованых черновых осей из электростали EA1N (35Г) // Современная электрометаллургия – 2009 - № 4 - с. 40-48

49. Суханцев С. С., Гитман М. Б., Елисеев А. С. Статистический анализ факторов, влияющих на образование дефектов при производстве вагонных осей // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова - 2013. - №1 – с. 54-56
50. Liu X., Wu Y., Xiang B. Experimental Research and Application of Vanadium Micro-Alloyed Steels in Railway Axle. // HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015, pp. 1027-1033
51. Johnson M.S., Evans R., Mistry P.J., Li S., Bruni S., Bernasconi A., Cervello S. Structural analysis for the design of a lightweight composite railway axle. // Composite Structures, 2022, Volume 290
52. Mistry P.J., Johnson M.S., Li S., Bruni S., Bernasconi A. Parametric sizing study for the design of a lightweight composite railway axle // Composite Structures, 2021, Volume 267
53. Чупраков Е. В., Мельниченко О. В. Оценка прочности оси колесной пары дифференциального исполнения // Вестник ИрГТУ - 2013. - №10 - С. 63-70
54. Regazzi D., Cantini S., Cervello S., Foletti S., Pourheidar A., Beretta S., Improving fatigue resistance of railway axles by cold rolling: Process optimisation and new experimental evidences, International Journal of Fatigue, 2020, Volume 137
55. Кротов, В. Н. Анализ процесса поверхностного упрочнения вагонных осей накаткой роликами // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(54). – С. 32-34.
56. Trojan K., Čapek J., Ganev N., Černy I., Kec J., Nemeček S. Residual stresses of laser-hardened railway axles. Paper presented at the Experimental Stress Analysis // 58th International Scientific Conference, EAN 2020, 2020, pp. 547-554.
57. Tang K., Wang W., Ding H., Zhou L., Guo J., He W., Zhou Z. Influence of laser shock peening on fatigue performance of LZ50 axle steel for railway wheel set. // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2020, Vol. 43, pp. 1938-1948

58. Wu S. C., Xu Z. W., Liu Y. X., Kang G. Z., Zhang Z. X. On the residual life assessment of high-speed railway axles due to induction hardening. // International Journal of Rail Transportation, 2018, Vol. 6, pp. 218-232.
59. Fajkoš R., Zima R., Strnadel B. The effect of induction hardening on fatigue behavior of railway axles. // 26th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings, 2017-January, pp. 578-582.
60. Fajkoš R., Strnadel B., Zima R. (2014). Fatigue limit of induction hardened railway axles. // 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings, 2014, pp. 587-592
61. Jeong D. Y., Perlman, A. B. Analysis of Minimum Rail Size in Heavy Axle Load Environment. // Proceedings of the 2013 Joint Rail Conference. 2013 Joint Rail Conference. Knoxville, Tennessee, USA. April 15–18, 2013
62. Замуховский А. В. Особенности работы земляного полотна на участках с движением тяжеловесных поездов // Железнодорожный транспорт. - 2016. - № 10. - С. 26-27.
63. Petriaev, A. V. The impact of heavy freight train on the roadbed. Paper presented at the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields // Proceedings of the 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRAA 2017, pp. 1905-1909.
64. Киреев А.Н., Витренко В.А. Совершенствование ультразвукового контроля осей колесных пар подвижного состава железных дорог. // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ). – 2016 - №2 – с. 116-122.
65. Князев Д. А. Обоснование периодичности освидетельствования полых осей колесных пар высокоскоростного подвижного состава: автореф. дис. к-та техн. наук, специальность : 05.22.07. - М. : МИИТ, 2019. - 24 с.
66. Школьник Л.М., Коваленко Ю.Е., Мартыглов Н.И., Усова Л.А. Полые оси и валы. - М., «Машиностроение», 1968 – 183 с.
67. Тумко А. Н., Логозинский И. Н., Пересаденко О. В. и другие. Исследование технологических схем производства профильных осевых

заготовок для подвижного состава железных дорог. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010 - №4. – с. 40–43

68. Петренко Ю. П., Мюнх В. Ф., Богатов А. А., Витькин Д. А. Анализ влияния технологических схем деформации на качество осевого металла ОАО НТМК // Металлург. – 2009. – № 10. – С. 55-57

69. Дудник И.Р., Иньшаков Н.Н., Щапов Н.П. Стальные вагонные оси центробежной отливки // Техника железных дорог. – 1950. - №7

70. Аникеев, В. В. Полунепрерывное литье полых стальных слитков: технология и качество // Сталь. – 2013. – № 11. – С. 20-24.

71. Буркин С. П., Бабайлов Н. А., Коршунов Е. А. и другие. Технологический вариант изготовления полой заготовки // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина», (г. Екатеринбург, 29 октября - 1 ноября 2012 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — С. 781-789

72. Кобелев О.А., Цепин М.А. Прошивка толстостенных трубных заготовок. // Труды седьмого конгресса прокатчиков (том 1). М.: МОО «Объединение прокатчиков» - 2007

73. Богатов А.А. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали : учеб. пособие — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 164 с

74. Галкин С.П., Романцев Б.А. Неравномерность радиальных перемещений и деформаций при прошивке в стане винтовой прокатки. // Производство проката. - 2009. - № 9. - С. 22–28.

75. Бурдуковский В. Г. Технология процессов ковки : учебное пособие.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022.— 348 с.

76. Хензель, А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1982. 360 с.

77. Чекмарев А. П., Друян В. М. Теория трубного производства. Учебное пособие для студентов вузов. - М. Металлургия 1976г. - 304 с
78. Коликов, А. П. Теория обработки металлов давлением : учебник — Москва : МИСИС, 2015. — 451 с
79. Шевакин Ю. Ф., Глейберг А. З. Производство труб, - Москва, Металлургия, 1968 г. - 440с.
80. Хавкин Г.О. Совершенствование методики расчета силовых параметров при косовалковой прошивке заготовок и обкатке труб // Сталь. - 2004. - №8. - С. 52-53.
81. Потапов, И. Н. Новая технология винтовой прокатки. - Москва : Металлургия, 1975 – 344с.
82. Потапов И.Н., Вавилкин Н.М., Юсупов В.С., Данилин А.А. Устойчивость упорного стержня малого диаметра при прошивке на стане винтовой прокатки // В сб. «Теория и технология обработки металлов давлением». – М., «Металлургия», 1982 (МИСиС. Научн. тр. №139), с. 9-13
83. Романенко В. П., Романцев Б. А., Илларионов Г. П. и другие. Способ получения заготовки для производства полой вагонной оси // Металлург. – 2014. – № 8. – С. 78-82
84. Скрипаленко М. М., Романцев Б. А., Баженов В. Е. и другие. Компьютерное моделирование процессов прошивки слитков из алюминиевого сплава в двухвалковом стане винтовой прокатки // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2018. – № 6. – С. 42-50
85. Ахмеров, Д. А., Выдрин А. В. Исследование процесса образования концевых участков труб при продольной прокатке в калибрах, образованных разным числом валков // Черные металлы. – 2021. – № 1. – С. 44-48
86. Топоров В. А., Пьянков Б. Г., Панасенко О. А. и другие. Исследование и внедрение процесса производства тонкостенных гильз на прошивном стане ПАО СТЗ // Сталь. – 2017. – № 5. – С. 34-37.
87. Орлов Д. А., Гончарук А. В., Кобелев О. А. и другие. Анализ особенностей процесса прошивки трубна ТПА 70-270 с применением метода

конечных элементов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 848-855.

88. Романенко, В. П., Степанов П. П., Крискович С. М. Производство полых вагонных осей методами винтовой прошивки и радиальной ковки // Металлург. – 2017. – № 10. – С. 44-48.

89. Xu Y., Zhang Y., Zhuang X., Cao Z., Lu Y., Zhao Z. Numerical modeling and anvil design of high-speed forging process for railway axles. // International Journal of Material Forming, 2021, Vol. 14, pp. 813-832.

90. Pokorný P., Dlhý P., Poduška J., Fajkoš R., Vojtek T., Náhlík L., Hutař P. Influence of heat treatment-induced residual stress on residual fatigue life of railway axles. // Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, Vol. 109

91. Goncharuk, A. V., Fadeev, V. A., & Kadach, M. V. Seamless pipes manufacturing process improvement using mandreling Solid State Phenomena, 2021, Том 316 SSP, Страницы 402 – 407

92. Fomin A. V., Romanenko V. P., Nikulin A. N., Sevastjyanov A. A. Investigation of skew piercing and upsetting effect on wheel steel mechanical properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 15, Nizhny Tagil, 18–19 июня 2020 года. – Nizhny Tagil, 2020.

93. Михалкин Д. В., Корсаков А. А., Панасенко О. А., Пьянков К. П. Параметры очага деформации и граничные условия процесса прошивки // Металлург. – 2021. – № 2. – С. 19-26.

94. Культешова В. В., Иванов А. В., Завора И. В., Липатов Р. Н. Структура и механические свойства горячекатанных полых заготовок для корпусных деталей из среднеуглеродистых сталей после прошивки, калибровки и сорбитизации // Металлург. – 2021. – № 6. – С. 37-42.

95. Будников А. С., Романцев Б. А., Харитонов Е. А. Определение диаметра валков станов винтовой прокатки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 9. – С. 683-688

96. Сурикова Н. С., Власов И. В., Деревягина Л. С. и другие. Влияние режимов поперечно-винтовой прокатки на механические свойства и вязкость

разрушения трубной стали // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 28-37.

97. Романцев Б.А., Алещенко А.С., Гусейнов Э.Р., Цюцюра В.Ю. Разработка метода и оборудования для испытаний материалов на знакопеременный изгиб при прошивке в станах винтовой прокатки // Черные металлы. – 2020. – № 11. – С. 29-34.

98. Ding, X., Sun, L., Huang, X., & Zhao, Z. Research on three-roll screw rolling process for Ti6Al4V titanium alloy bar. // High Temperature Materials and Processes, 2019, Vol. 38, pp. 178-182.

99. Богатов, А. А., Павлов Д. А. Исследование деформированного состояния металла при обжатии заготовки в трехвалковом стане винтовой прокатки // Металлург. – 2017. – № 4. – С. 66-70.

100. Голубчик Р. М., Меркулов Д. В., Клемперт Е. Д. и другие. Сравнение косовалковых станов различного конструктивного исполнения при прошивке непрерывнолитых заготовок // Черные металлы. – 2009. – № 6. – С. 15-20.

101. Вавилкин Н.М., Бухмиров В.В. Прошивная оправка: науч. изд. - М.: МИСИС, 2000. - 128 с.

102. Власов А. В., Стебунов С. А., Евсюков С. А. и другие. Конечно-элементное моделирование технологических процессов ковки и объемной штамповки : учеб. пособие - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 383 с.

103. Орлов Д.А Совершенствование технологии двойной прошивки заготовок на станах винтовой прокатки.: дис. канд. тех. наук: 05.16.05: защищена 15.12.2021 — М., 2021. — 113 с.

104. Кулешов А.В., Цвик Л.Б. Оценка прочности несущих элементов железнодорожных вагонов : метод. пособие по лабораторному курсу дисциплины «Конструирование и расчет вагонов» - Иркутск : ИрГУПС, 2012. – 208 с.

## Приложение А.

### УТВЕРЖДАЮ

Директор института

Экотехнологий и инжиниринга  
НИТУ МИСИС  
А.Я. Травянов  
«\_\_\_» 2024

### АКТ

Настоящий Акт составлен в том, что методики моделирования процессов прошивки особотолстостенных заготовок, а также расчёта оправочного стержня прошивного стана на устойчивость, созданные в рамках диссертационной работы Крисковича С.М. «Исследование и разработка технологического процесса производства полых вагонных осей из особотолстостенных заготовок, полученных винтовой прошивкой», используются в учебном процессе на кафедре Обработка металлов давлением НИТУ МИСИС. Методики моделирования процессов прошивки особотолстостенных заготовок применяются при подготовке бакалавров по направлениям 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» в дисциплинах «Компьютерное проектирование узлов и машин обработки металлов давлением» и «Моделирование и инжиниринг промышленных конструкций», и магистров по направлениям 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» в дисциплине «Моделирование технологических процессов». Методики опубликованы в учебном пособии Компьютерное моделирование технологических процессов ОМД лаб. Практикум // М.: изд. Дом НИТУ МИСиС», 2019 – 146 с.

Заведующий каф. ОМД

Ученый секретарь каф. ОМД

Научный руководитель



А.С. Алещенко

Т.Ю. Сидорова

В.П. Романенко

## Приложение Б.



ВЫКСУНСКИЙ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ  
ЗАВОД

Акционерное общество  
«Выксунский  
металлургический  
завод»



УТВЕРЖДАЮ  
Директор инженерно-  
технологического центра, к.т.н.

А.В. Мунтинг

«\_ \_ \_ \_ \_ 20\_ \_ \_ \_ \_

### Акт

### о промышленном опробовании технологического процесса производства особотолстостенных заготовок для полых вагонных осей на трубопрокатном агрегате ТПА 70-270 АО «ВМЗ»

В рамках выполнения совместной работы НИТУ «МИСиС» и АО «ВМЗ» по теме «Определение возможности изготовления осей для колесных пар, в том числе для скоростных электропоездов, в условиях АО «ВМЗ» проведено промышленное опробование технологического процесса производства особотолстостенных заготовок для полых вагонных осей на трубопрокатном агрегате ТПА 70-270.

В ходе выполнения работы разработаны технические условия ТУ РГ 0910-280-0001-2011 «Заготовки осевые для получения черновых полых осей (опытная партия)», ТУ 1308-118-05757848-2014 «Трубы стальные бесшовные горячедеформированные особотолстостенные для изготовления черновых полых вагонных осей. Опытная партия». Разработано техническое задание на проектирование технологического производства полых вагонных осей.

На промышленном агрегате ТПА 70-270 АО «ВМЗ» проведены экспериментальные работы по винтовой прошивке сплошной заготовки, прокатке и получению особотолстостенных полых заготовок для черновых полых вагонных осей. На основе экспериментальных исследований для принятой конструкции полой оси определен диаметр оправки (96 мм), разработаны технологические режимы прошивки заготовки диаметром 250 мм в двухвалковом стане и калибрования в трехвалковом станах винтовой прокатки, рассчитаны таблицы прокатки, определены настроочные параметры прошивного стана и его выходной стороны, скорректирована калибровка рабочего инструмента, изготовлены сплошные заготовки из осевой стали диаметром 250 мм и длиной 2500 мм с целью исследования и получения прошитых заготовок для полых вагонных осей вместо сверления.

По разработанным технологическим режимам были получены заготовки диаметром 237 мм и толщиной стенки 70 мм ( $D/S=3,38$ ) с разностенностью менее 12%. Установлено, что прокатка на агрегате

протекала устойчиво при нагрузках, не превышающих значения технических характеристик оборудования. Полученные значения предельных отклонений гильз по наружному диаметру составили  $\pm 1,0\%$ , а по толщине стенки  $\pm 5-10\%$ , что соответствует требованиям ТУ 1308-118-05757848-2014.

Прошитые заготовки были отгружены в ПАО «Мотовилихинские заводы», где из них были изготовлены полые черновые и чистовые вагонные оси заданной конструкции. По механическим свойствам оси существенно превышали требования ГОСТ 33200-2014.

Опробование технологического процесса подтвердило возможность изготовления на ТПА 70-270 АО «ВМЗ» оси-труб с толстостенными заготовками для полых вагонных осей. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности предложенной технологии производства полых вагонных осей и дальнейшей её реализации в рамках металлургических производств.

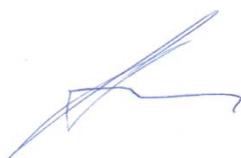
Начальник отдела по технологии  
производства труб малого и среднего  
диаметра УТТП ИТЦ

Начальник управления по технологии  
трубного производства ИТЦ

Начальник управления по технологии и  
качеству ДНГПТ

Участники работы от НИТУ «МИСиС»:  
Аспирант кафедры ОМД

Профессор кафедры ОМД, к.т.н.



И.В. Пейганович



С.А. Гришин



Д.В. Рошин



С.М. Крискович



В.П. Романенко

## Приложение В.

Публичное акционерное общество  
специального машиностроения и металлургии  
**“МОТОВИЛИХИНСКИЕ ЗАВОДЫ”**  
(ПАО “МОТОВИЛИХИНСКИЕ ЗАВОДЫ”)

### ДЕПАРТАМЕНТ ГЛАВНОГО МЕТАЛЛУРГА

1905 года ул., д. 35, Пермь, 614014  
Тел. (342) 260-58-26, факс (342) 260-74-62  
e-mail: [balandina\\_nal@mz.perm.ru](mailto:balandina_nal@mz.perm.ru)

19.04.2016г. № 244 / 385

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Утверждаю:

Главный металлург  
ПАО «Мотовилихинские заводы»  
Департамент главного металлурга  
С.Ю. Нижегородов



### АКТ

выполнения Программы работ по получению черновых полых осей для грузовых, пассажирских и высокоскоростных поездов путем деформирования на РКМ заготовок, прошитых винтовой прокаткой.

В ПАО «Мотовилихинские заводы» были поставлены четыре трубные заготовки. Одна исходная заготовка имела незначительные отклонения от расчетных размеров. Другие заготовки соответствовали разработанной тех. документации.

В соответствии с программой работ была выполнена ковка заготовок для получения черновых осей с отверстием переменного сечения.

В ходе реализации Программы были разработаны и согласованы конструкции черновых полых поковок переменного сечения (чертеж РКП/ЗГ) из полой заготовки 238x105 мм и поковок с цилиндрической центральной частью (чертежи РКП-2/ЗГ и РКП-2А/ЗГ) из полой заготовки 218x90 мм; разработана экспериментальная технология ковки прошитых заготовок; проведена предварительная подготовка, изготовлен инструмент.

Выполнена экспериментальная ковка заготовок по чертежам РКП/ЗГ, РКП-2/ЗГ и РКП-2А/ЗГ. Заготовки РКП откованы за два перехода: первый – на дорне Ø90 мм, второй – с обжатием по концам заготовки, используя вкладыш Ø36 мм. У заготовок РКП-2 и РКП-2А средняя часть деформации не подвергалась, проводилось обжатие по концам заготовки для формирования шеек с использованием вкладыша.

В процессе выполнения работ выявлено наличие вмятин от рычагов машины выгрузки из кольцевой нагревательной печи на средней части всех четырёх осей. Других замечаний нет.

Заготовки по чертежам РКП и РКП-2 переданы в дальнейшую механическую обработку для получения чистовых осей.

От ПАО «Мотовилихинские заводы»:  
Нач. бюро ОМД  
Нач. ТБ цеха №31  
Инж. – технолог цеха №31

О.В. Перминова  
Н.Н. Соловьева  
В.И. Сорокина

От НИТУ «МИСиС»:  
Проф. каф. ОМД  
Инж. каф. ОМД

В.П. Романенко  
С.М. Крискович

От АО «ВМЗ»  
Ведущий инж. - технолог

Д.А. Орлов