

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНО УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ МИСИС

На правах рукописи

ШЕРБУТАЕВ НОДИРБЕК ИЛХОМ УГЛИ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОКАТКИ
ТРУБ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ТПА С АВТОМАТИЧЕСКИМ СТАНОМ**

2.6.4 – «Обработка металлов давлением»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

Гончарук Александр Васильевич

Москва – 2025

Содержание

Введение	5
Глава 1. Литературный обзор	9
1.1 Технологический процесс производства труб на трубопрокатных агрегата ТПА с автоматическим станом	9
1.2 Анализ влияния калибровок технологического инструмента на качественные показатели труб (дефекты поверхности, поперечная и продольная разностенность, кривизна труб)	16
1.2.1 Прошивной стан	17
1.2.2 Геометрические параметры процесса винтовой прокатки	19
1.2.3 Автоматические станы	20
1.2.4 Особенности производства горячекатаных бесшовных труб на автоматическом стане ТПА 220	21
1.3 Дефекты на наружной и внутренней поверхности гильз	23
1.3.1 Дефекты труб, связанные с разрушением металла при прошивке	24
1.4 Выводы по главе	28
Глава 2. Разработка алгоритма расчёта параметров очага деформации при прошивке	30
2.1 Алгоритм расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке труб на прошивных станах	30
2.1.1 Новый алгоритм расчёта определения параметров очага деформации	30
2.1.2 Сравнительный анализ полученных результатов	39
2.2 Разработка программы для ЭВМ «Eisen v2.0» с целью расчёта параметров процесса прошивки	42
2.3 Оценка адекватности результатов программы	47
2.3.1 Моделирование процесса прошивки на ТПА 220 трубы с профилем $\text{Ø}219 \times 14$	47
2.4 Выводы по главе	51
Глава 3. Исследование процесса прошивки после реконструкции прошивного стана ТПА 220 с целью повышения качества, точности и расширения сортамента труб	52
3.1 Освоение нового сортамента труб диаметром $\text{Ø}245$ мм в условиях ТПА 220	52
3.2 Реконструкция валкового узлов прошивного стана ТПА 220	55

3.3 Калибровка инструментов прошивного стана ТПА 220.....	57
3.4 Экспериментальная прокатка на стане ТПА 220.....	59
3.4.1 Подготовка к экспериментальной прокатке.....	59
3.4.2 Результаты экспериментальной прокатки	61
3.5 Сравнение полученных результатов опытной прокатки и расчётов в компьютерной программе «Eisen v2.0»	63
3.6 Выводы по главе	64
Глава 4. Исследование образования дефектов на концевых участках тонкостенных гильз при прокатке на ТПА с автоматическим станом.....	66
4.1 Методика проведения исследований	66
4.2 Моделирование в среде «QForm».....	68
4.3 Анализ результатов моделирования	70
4.3.1 Моделирование процесса раскатки на автоматическом стане.....	73
4.3.1.1 Результаты моделирования процесса раскатки в «QForm» трубы Ø159×4,5	73
4.4 Моделирование статической нагрузки на втулку в среде «SolidWorks Simulation»	75
4.5 Экспериментальная прокатка на автоматическом стане ТПА 220.....	76
4.5.1 Изготовление инструментов	76
4.5.2 Инструменты, используемые в экспериментальной прокатке на стане ТПА 220	79
4.5.3 Этапы экспериментальной прокатки на стане ТПА 220.....	79
4.5.4 Результаты экспериментальной прокатки на автоматическом стане ТПА 220.....	79
4.5.5 Анализ состояния инструмента после экспериментальной прокатки	81
4.5.6 Корректировка конструкции инструмента.....	84
4.6 Выводы по главе	85
Глава 5. Исследование прокатки труб на автоматическом стане с цилиндрической оправкой... 87	
5.1 Геометрические параметры калибров.....	87
5.2 Прокатка на автоматическом стане	88
5.3 Новый способ прокатки на автоматическом стане.....	88
5.4 Моделирование процесса прокатки на автоматическом стане ТПА 220 с цилиндрической оправкой	90

5.4.1 Процесс прокатки на автоматическом стане ТПА-220 с цилиндрической оправкой.....	92
5.4.2 Отклонение от номинальных размеров труб при прокатке на автоматическом стане с цилиндрической оправкой.....	93
5.5 Моделирование прокатки на автоматическом стане с конической оправкой	94
5.5.1 Процесс прокатки на автоматическом стане ТПА-220. Труба $\text{Ø}127 \times 4,5$	94
5.5.2 Отклонение от номинальных размеров труб при прокатке на автоматическом стане с конической оправкой.....	95
5.6 Сравнительный анализ прокатки на автоматическом стане с цилиндрической и конической короткой оправкой.....	96
5.7 Исследование процесса раскатки на стане ДУО-210 с цилиндрической оправкой.....	99
5.7.1 Усилие металла на оправку в I-проходе	100
5.7.2 Усилие металла на оправку во II-проходе	100
5.7.3 Усилие металла на валок в I-проходе	101
5.7.4 Усилие металла на валок во II-проходе	101
5.7.5 Геометрические параметры полученной трубы.....	102
5.8 Экспериментальная прокатка на стане ДУО-210	102
5.9 Проведение эксперимента	104
5.10 Сравнительный анализ.....	105
5.11 Выводы по главе	106
Выводы	108
Список использованных источников.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А	116
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ С.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ D	141

Введение

Актуальность темы исследования

Трубопрокатные агрегаты (ТПА) с раскатным автоматическим станом (автомат-станом) производят значительный объем горячекатаных бесшовных труб в России, около 1 млн. тонн в год и являются наиболее распространенными в мире при производстве бесшовных тонкостенных горячекатаных труб, в том числе из легированных сталей, что объясняется их высокой маневренностью и универсальностью, а также высокой производительностью [1]. Вместе с тем технологический процесс прокатки труб в автоматическом стане имеет ряд недостатков, связанных прежде всего с образованием дефектов на внутренней поверхности и задних концах труб. В связи с изложенным тема исследования является актуальной.

Степень ее разработанности

В работе, направленного на совершенствование технологии производства труб из углеродистых сталей на трубопрокатных агрегатах с автоматическим станом, основное решение поставленной задачи достигается за счёт повышения точности расчёта настроечных параметров прошивного стана и оптимизации режимов прошивки и прокатки на автоматическом стане. Разработанный алгоритм послужил основой для создания компьютерной программы, позволяющей проводить расчёты параметров винтовой прокатки. Своевременное и точное определение настроечных параметров прошивного стана способствует значительному снижению вероятности образования дефектов на наружной и внутренней поверхностях горячекатаных бесшовных труб.

Цели и задачи

Целью работы является совершенствование технологии прокатки труб на ТПА с автоматическим станом, а именно устранение образования дефектов при прошивке и раскатке путем изменения конструкции деталей рабочей клетки прошивного стана и оправочного узла автоматического стана.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выявить причины возникновения основных дефектов при производстве горячекатаных бесшовных труб на трубопрокатном агрегате ТПА 220 с автоматическим станом;
- разработать алгоритм расчета геометрических параметров очага деформации в процессе прошивки на станах винтовой прокатки и программу его реализации на ЭВМ;
- на основании полученных результатов компьютерного моделирования процесса прошивки произвести доработку и разработать новую конструкцию барабанов рабочей клетки прошивного стана;

- для устранения образования дефектов при раскатке в автоматическом стане изучить механизм их возникновения с помощью моделирования в программе «QForm» и спроектировать новый оправочный узел, произвести его апробацию в ходе экспериментальной прокатки на трубопрокатном агрегате ТПА 220;

- для проверки адекватности полученных результатов моделирования процесса раскатки на конической и цилиндрической оправке провести экспериментальную прокатку на стане ДУО-210 в условиях НИТУ МИСиС.

Научная новизна работы.

Разработан алгоритм расчета геометрических параметров очага деформации при прошивке на двухвалковых прошивных станах с использованием бочковидных, чашевидных и грибовидных валков. Алгоритм учитывает особенности прокатки с заниженной или завышенной осью прокатки.

Создана программа для расчета геометрических параметров очага деформации, калибровок технологического инструмента и таблиц прокатки для всего сортамента выпускаемых труб.

Разработана новая схема прошивки с включением участка «зоны отдыха» на входном конусе, длина которого составляет 22 мм (3,7 % от общей длины входного конуса). Увеличен калибрующий участок, что обеспечивает большее количество циклов калибрования гильзы, повышая точность и качество прошиваемых гильз.

На основе результатов моделирования процесса раскатки предложен новый способ раскатки на автоматическом стане с применением цилиндрической перемещаемой оправки.

Практическая значимость и реализация работы.

Разработан классификатор дефектов, возникающих на наружной и внутренней поверхностях горячекатаных бесшовных труб.

На основе результатов моделирования процесса раскатки предложены технологическое решение и конструкция инструмента, направленные на минимизацию образования концевых продольных складок на черновых трубах при раскатке на автомат-стане ТПА.

С целью повышения качества гильз и расширения сортамента разработаны: новая конструкция барабана с рабочим валком, усовершенствованные калибровки валков, оправок и линеек, а также обновленная таблица прокатки для новых инструментов прошивного стана ТПА 220 с автоматическим станом.

По результатам экспериментальных исследований, проведенных на ТПА 220 с автоматическим станом были скорректированы технологические режимы производства горячекатаных труб повышенного качества.

Методы исследования и достоверность результатов.

Экспериментальные исследования выполнены на трубопрокатном агрегате ТПА 220 и на стане ДУО-210, расположенном в лаборатории НИТУ МИСИС. Компьютерное моделирование процесса прошивки осуществлено с использованием программной среды «QForm». Прочностные расчёты выполнены в среде «SolidWorks Simulation». Разработанная компьютерная программа написана на языке программирования «Python 3.9», а графический способ определения геометрических параметров реализован с помощью программного комплекса «КОМПАС 3D».

Личный вклад соискателя. Все изложенные в диссертации результаты исследования получены либо соискателем лично, либо при его непосредственном участии.

Положения, выносимые на защиту:

Разработан алгоритм расчета параметров процесса прошивки на станах винтовой прокатки с использованием бочковидных, чашевидных и грибовидных валков, включая условия прошивки с заниженной или завышенной осью прокатки.

Предложены новые режимы процесса прошивки, адаптированные к различным технологическим схемам, с использованием разработанных калибровок инструмента.

Разработаны технологические решения и конструкция инструмента, направленные на минимизацию образования концевых складок на черновых трубах при прокатке на автомат-стане ТПА 220.

Предложен новый способ раскатки на автоматическом стане, предполагающий использование цилиндрической перемещаемой оправки, а также проведены экспериментальные исследования на стане ДУО-210 в лабораторных условиях НИТУ МИСИС.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 4 статьях, опубликованных в научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации (ВАК РФ). Это подтверждает научную значимость выполненного исследования и его соответствие высоким требованиям научной публикационной деятельности.

В рамках работы разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ, предназначенная для расчёта геометрических параметров очага деформации в процессе прошивки на винтовых станах. Свидетельство о государственной регистрации программы свидетельствует о её уникальности и практической применимости.

Кроме того, получен патент на изобретение «Способ продольной прокатки труб на автоматическом трубопрокатном стане» RU № 2 823 281, опубл. БИ №21 2024г.

Апробация результатов диссертационного исследования

Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены на различных конференциях и опубликованы в научных статьях, что подтверждает их

практическую значимость и теоретическую новизну. Ниже приведены ключевые мероприятия и публикации:

1. Шербутаев Н. И. «Разработка программы для ЭВМ с целью определения настроечных параметров стана». Доклад представлен на «Первой заводской молодёжной научно-практической конференции», которая проходила в г. Первоуральск в августе 2021 года.

2. Шербутаев Н. И. «Разработка программы для ЭВМ с целью определения настроечных параметров стана». Доклад представлен на международной конференции «XVII Молодёжная научно-практическая конференция «Горизонты»», проходившей в г. Сочи в октябре 2021 года.

3. Шербутаев Н. И. «Разработка универсальной математической модели и компьютерной программы с целью автоматизации определения настроечных параметров двухвалковых прошивных станов». Доклад представлен на VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и молодёжь», проведённой в г. Иркутск в 2022 году.

4. Шербутаев Н. И. «Developing a computer program applied to determine geometry parameters of the deformation zone, when piercing round billets on piercing mills». Работа опубликована в сборнике «Magnitogorsk rolling practice 2022» – Proceedings of the VI International Youth Scientific and Technical Conference, г. Магнитогорск, 2022 г., с. 60–62.

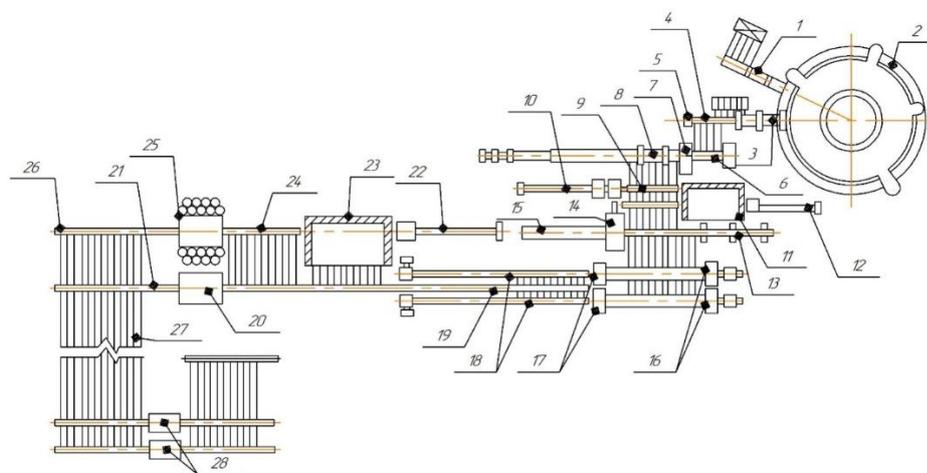
5. Шербутаев Н. И. «Разработка универсальной математической модели и компьютерной программы для определения настроечных параметров прошивного стана ТПА». Доклад представлен на международной конференции «XXIV Научно-техническая конференция молодых работников ПАО «ММК», проведённой в г. Магнитогорск 14 мая 2024 года.

Данные выступления и публикации подтверждают актуальность проведённого исследования и его востребованность в научной и промышленной среде.

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Технологический процесс производства труб на трубопрокатных агрегатах ТПА с автоматическим станом

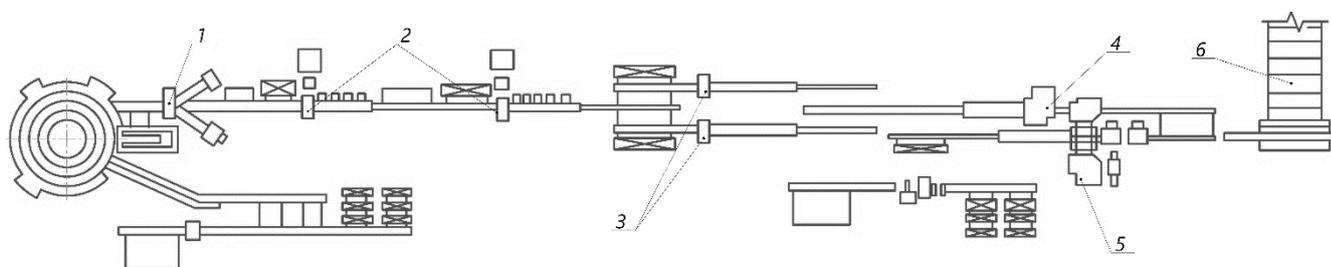
Трубопрокатные агрегаты с автоматическим станом или со станами «тандем» для производства горячекатаных бесшовных труб можно разделить на три типоразмера: малые, средние и большие трубопрокатные агрегаты. На малых трубопрокатных агрегатах ТПА 140 производят трубы диаметром максимум до 146÷159 мм. Средние трубопрокатные агрегаты ТПА 250 предназначены для производства труб диаметром не более 245÷273 мм. На больших трубопрокатных агрегатах ТПА 400 производят трубы диаметром до 402÷426 мм [2], они имеют подогревательные печи после прошивного стана для подогрева прошитой гильзы перед раскаткой на автоматическом стане (в отечественных агрегатах эти печи по своему назначению практически не используют). Схема расположения оборудования трубопрокатного агрегата с автоматическим станом и со станом «тандем» показаны на рисунках 1.1 и 1.2.



1 – загрузочная машина; 2 – нагревательная печь кольцевого типа; 3 – выгрузочная машина; 4 – рольганг; 5 – зацентровщик заготовок; 6 – наклонная решетка; 7 – прошивной стан; 8 – выходная сторона прошивного стана; 9 – наклонная решетка; 10 – толкатель; 11 – подогревательная печь для прошитых гильз; 12 – толкатель; 13 – передний стол автоматического стана; 14 – автоматический стан; 15 – задний стол автоматического стана; 16 – вводные рольганги обкатных машин; 17 – обкатные машины; 18 – выводные рольганги обкатных машин; 19 – транспортный рольганг; 20 – калибровочный стан; 21 – выводной рольганг калибровочного стана; 22 – толкатель труб в подогревательную печь; 23 – подогревательная печь редуционного и калибровочного станом; 24 – вводный рольганг редуционного стана; 25 – редуционный стан; 26 – выводной рольганг редуционного стана; 27 – охлаждающий стол; 28 – правильные машины.

Рисунок 1.1 – Схема агрегата ТПА с автоматическим станом [2]

Различие в планировке того и другого трубопрокатного агрегата заключается в том, что оборудование трубопрокатных агрегатов с автоматическим станом имеет каскадное расположение, [3] т. е. каждое последующее оборудование агрегата находится на уровне ниже, а перемещение трубы от стана к стану осуществляется перекачиванием по наклонным решеткам. В трубопрокатных агрегатах со станом «тандем» оборудование расположено на одной отметке и имеют осевую выдачу труб в каждом стане и транспортирование осуществляется рольгангами [2]. При этом транспортирование труб на обкатные машины и в подогревательные печи редуционного стана осуществляется через боковую выдачу. Осевая выдача труб значительно повышает темп прокатки и производительность трубопрокатных агрегатов и сокращает длительность цикла, при этом температура труб, поступающих на обкатные машины как при производстве на агрегатах с тандем станом, так и при производстве с автоматическим станом одинаковы.

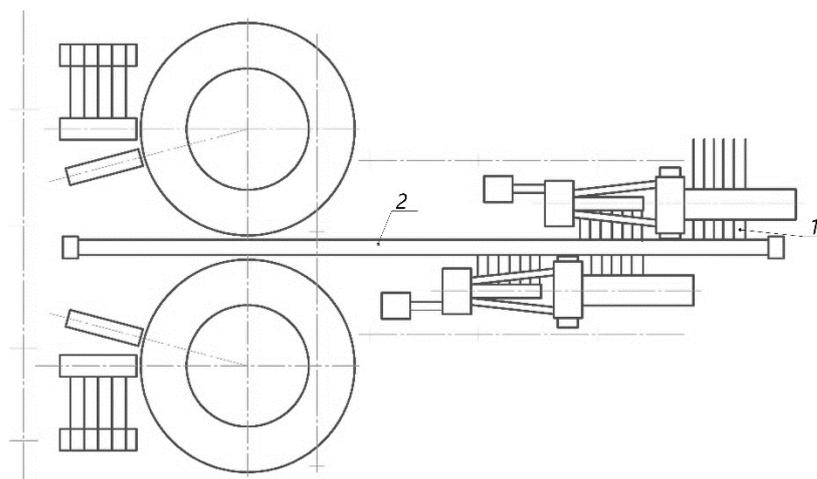


1 – прошивной стан; 2 – двухвалковые клетки для продольной прокатки; 3 – трехвалковые риллинг-станы; 4 – двухвалковый калибровочный стан; 5 – трехвалковый редуционно-растяжной стан; 6 – холодильник;

Рисунок 1.2 – Схема расположения оборудования в агрегате со станом тандем [2]

Наиболее удачная компоновка головной части агрегата большого типоразмера, когда используют две кольцевые печи и два одинаковых по конструкции стана поперечно-винтовой прокатки (одним из которых является прошивным, а другой элонгатором) показана на рисунке 1.3.

Достоинством такого расположения является возможность использования для прошивки как первого, так и второго стана в тех случаях, когда гильзы получают в одну операцию (без элонгатора). В большинстве действующих агрегатов расположение станов таково, что при получении гильз в одну операцию прошивку можно осуществить только на одном из двух имеющихся станов, что снижает маневренность агрегата.



1 – съемная наклонная решетка; 2 – транспортный рольганг

Рисунок 1.3 – Схема расположения оборудования головной части агрегата с прошивным станом и элонгатором [2]

В Японии используют агрегаты большого типоразмера с установкой прессовального стана [2]. Это позволяет использовать более дешевую непрерывно литую заготовку квадратного сечения. В этом стане получают гильзу с отношением диаметра к толщине стенки, равным 4. Затем на первом элонгаторе производят поперечно-винтовую прокатку, признанную, кроме осуществления деформации стенки, снижать поперечную разностенность, полученную на прессовальном стане. На втором элонгаторе получают тонкостенную гильзу, необходимую для прокатки в автоматическом стане. Остальной состав оборудования не отличается от типового.

Технологический процесс протекает в следующей последовательности. Нагретые до необходимой температуры заготовки выгружают из печи и направляют к пневматическому зацентровщику. Зацентровка позволяет снизить поперечную разностенность переднего конца гильзы и существенно облегчает первичный захват. По окончании процесса центровки, заготовка передается выбрасывателем на решетку и перекачивается во вводной желоб прошивного стана. Подача заготовки в валки производится пневматическим толкателем.

В агрегатах рассматриваемого типа используют прошивные станы различной конструкции (с бочковидными и грибовидными валками). Поскольку при прошивке получают гильзы разных размеров, в том числе и весьма тонкостенные, то используют только двухвалковые станы с линейками, в которых можно создать закрытый очаг деформации с плотным прилеганием линеек к рабочим валкам. Трехвалковые станы для рассматриваемых агрегатов не могут быть использованы, так как на них между валками образуется значительный зазор, а установить в этот зазор линейку конструктивно невозможно. По этой же причине в рассматриваемых агрегатах не могут быть использованы двухвалковые станы с вращающимися дисками вместо линеек, иногда используемые в других агрегатах. Последовательность

технологических операций при прошивке не зависит от типа рабочей клетки прошивного стана и ее определяют в зависимости от схемы выходной стороны. Устаревшие отечественные прошивные станы и многие зарубежные станы имеют боковую выдачу гильз; станы последней отечественной конструкции (в частности, входящие в агрегаты со станом тандем) имеют осевую выдачу гильз. В некоторых зарубежных странах еще используют оправки, заменяемые после каждой прошивки. В отечественной практике все прошивные станы работают на несменяемой оправке, лишь при производстве труб из высоколегированных марок сталей используют сменяемые оправки. Успешное внедрение таких оправок позволило применить осевую выдачу гильз, при которой после окончания прошивки стержень с оправкой удерживается специальным механизмом перехвата стержня, а гильза фрикционными роликами стягивается со стержня после того, как откидывается упорная головка. В процессе прошивки фрикционные ролики находятся в разведенном состоянии, свободно пропуская гильзу.

Независимо от схемы выдачи гильз на выходной стороне прошивного стана имеются центrovатели или специальные клещи, которые удерживают стержень и гильзу от изгиба. Количество центrovателей может быть от 2 до 4 в зависимости от длины прошитой гильзы. По мере подхода гильзы ролики центrovателя разводятся, образуя роликовую проводку. Получение гильз характеризуется высокой степенью деформации: когда гильзу получают в одну операцию, коэффициент вытяжки при прошивке находится в пределах от 1,25 до 4,70. При получении гильз в две операции, т.е. когда в агрегате имеется второй прошивной стан (элонгатор), коэффициент вытяжки меньше: при прошивке он не превышает 2,0, а при прокатке на втором прошивном стане (в элонгаторе) находится в пределах от 1,25 до 2,70. Суммарный коэффициент вытяжка при прокатке гильзы в двух станах достигает $5,0 \div 5,4$ [2]. Прошитая гильза к автоматическому стану передается по наклонной решетке, в конце которой перед входным желобом автоматического стана установлен дозатор, удерживающий гильзу на решетке (если в автоматическом стане не окончена прокатка предшествующей трубы).

Прокатка на автоматическом стане осуществляют в два прохода, иногда производят прокатки в три прохода. Перед каждым проходом во внутрь гильзы бросают поваренную соль. Поваренная соль служит в качестве технологической смазки. После каждого прохода спутник с оправкой снимают со стержня, а рабочие валки автоматического стана разводятся для передвижения трубы на переднюю сторону стана. Гильзы в автоматический стан задают с помощью пневматического толкателя. После первого прохода трубы кантуются на 90° и, если для этой операции используют кантующие ролики, то этими же роликами пользуются для задачи трубы в валки. Перемещение трубы на переднюю сторону стана производится роликами обратной подачи. После окончания прокатки труба сбрасывается с вводного желоба на решетки и скатывается на рольганг, ведущий к риллинг-станам. Иногда для передачи труб, кроме

наклонной решетки, используют шлеперную передачу. Валки автоматического стана обычно являются многоручьевыми. Разные калибры предназначены для прокатки труб различных диаметров. В связи с этим передний стол имеет возможность перемещаться и устанавливаться таким образом, что ось вводного желоба совпадает с осью нужного калибра. Известны одноручьевые автоматические станы, в которых переход на прокатку труб нового диаметра требует замены валков. В таких случаях передний стол стационарный. Одноручьевые станы имеют более жесткую конструкцию, что повышает точность труб [3].

В станах для раскатки гильз осуществляют сравнительно небольшое относительное обжатие; абсолютное обжатие по стенке составляет $3\div 6$ мм, а коэффициент вытяжки $1,15\div 2,10$. Прокатка производится на конической оправке. С целью равномерного распределения деформации по каждому проходу применяют оправки разного диаметра. Во втором проходе используют оправки диаметром больше на $1\div 2$ мм. Для упрощения механизмов, использующихся для замены оправок, иногда для первого и второго проходов используют оправки одного номинального диаметра.

Величина деформации в станах тандем такая же, как и в автоматическом стане. При прокатке труб в станах тандем, использующих осевую выдачу труб, возвратное движение труб не требуется, и поэтому заменять оправки после каждого прохода нет надобности; их заменяют только в связи с износом (практически после прокатки 150–200 труб) [4]. В рабочих клетях этих станов нет механизмов для подъема верхнего валка, обязательного в автоматическом стане, что делает такие клетки более жесткими, обеспечивая повышенную точность труб толщины стенки. Различное распределение деформации в этих станах достигают применением неодинаковых калибров в I и II клетях. Каждая из двух последовательно расположенных клеток имеет одноручьевые валки, и при износе калибров делают перевалку (можно производить замену клеток на заранее подготовленные или же делать перевалку непосредственно в каждой клетке).

Задние столы обоих станов оборудованы механизмами, характерными для осевой выдачи – фрикционными роликами, перехватчиком стержня и центрователем. Для уменьшения продольного изгиба стержня устанавливают проводки. На агрегатах со станом тандем малого типоразмера прокатку ведут из заготовок одного-двух диаметров. Соответственно валки станов тандем имеют калибры одного-двух номинальных диаметров, причем при переходе на прокатку труб нового диаметра каких-либо замен оборудования на выходной стороне делать нет необходимости.

Черновые труб после прокатки передаются к обкатным машинам по наклонным решеткам. В процессе обкатки труб на обкатных машинах происходит выравнивание толщины стенки – раскатываются «бунты» (утолщенная стенка, соответствующая выпускам калибров стана продольной прокатки). При этом диаметр увеличивается (примерно на $5\div 8\%$), а средняя

толщина стенки несколько уменьшается, так что коэффициент вытяжки оказывается весьма близким к 1. При риллинговании (обкатке) значительно улучшается качество поверхности труб, а в отечественных станах последней конструкции используют осевую выдачу. Валки риллинг-станов изготавливают их отбеленного чугуна и для улучшения захвата иногда применяют специальные меры – в некоторых станах устанавливают фрикционные задающие ролики, в других входной рольганг делают с косо расположенными роликами [4].

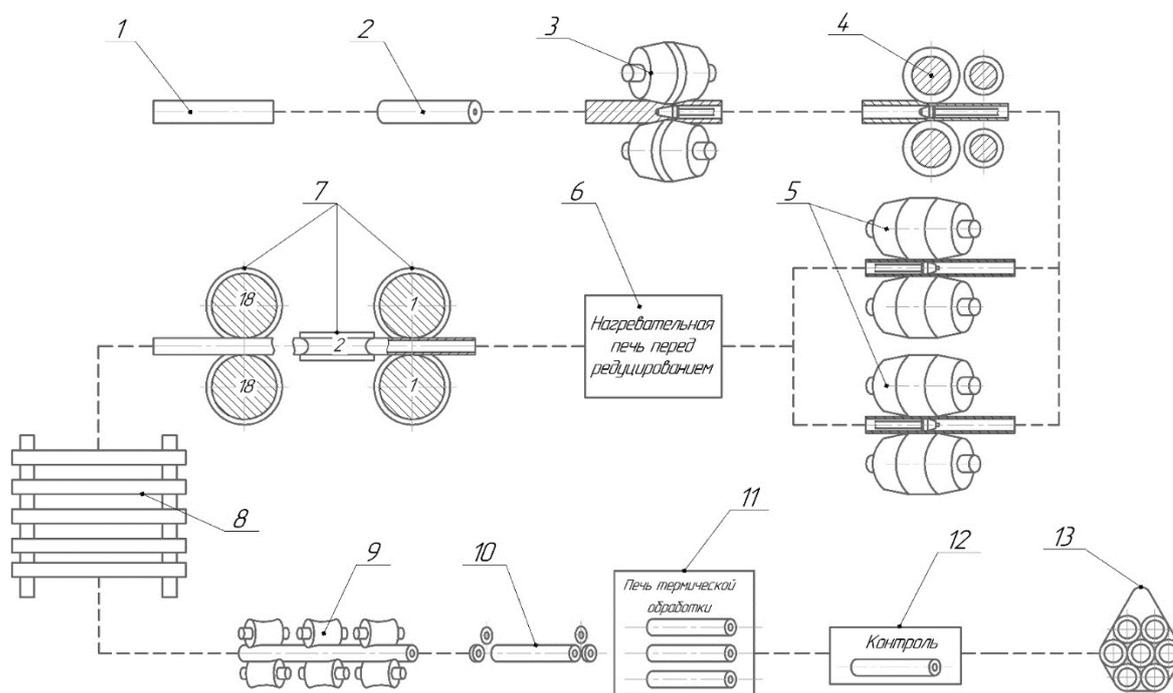
Обычно для риллингования используют двухвалковые станы. В некоторых отечественных агрегатах установлены трехвалковые станы, которые не дают сколько-нибудь существенных преимуществ, однако захват труб в этих станах надежнее. Вместе с тем нельзя не считаться с тем, что конструктивно такие станы сложнее, и поэтому перевалка оказывается более длительной.

Старые агрегаты имеют калибровочные станы с числом клетей от 3 до 7. В настоящее время используют в основном калибровочные станы с числом клетей 9 и 12. Применение многоклетевых станов повышает маневренность агрегата, но требует предварительного подогрева труб.

В современных агрегатах малого типоразмера редуционные станы работают с натяжением (редуционно-растяжные станы). Несмотря на то, что длина черновых труб не превышает 13÷15 м, использование редуционно-растяжных станов является целесообразным. Значительный эффект данного процесса достигается в связи с разработкой технологии прокатки труб с утоненными концами перед редуционным станом, что компенсирует последующее утолщение и значительно уменьшает технологические потери при обрезки концов [2]. В редуционно-растяжных станах длина труб достигает 60÷80 метров, а для резки концов используются летучие пилы. После этого трубы поступают на охлаждающие столы, которые, кроме основной функции (охлаждения труб), выполняют ещё и дополнительную – распределение труб по поточным линиям отделки [3]. Технологический процесс получения труб на ТПА 140 представлен на рисунке 1.4.

Особенностью технологического процесса производства труб на ТПА 220 является нагрев заготовки в методических печах. На ТПА 220 имеется две методические печи для повышения производительности агрегата. С целью равномерного нагрева заготовки по всему сечению производится кантовка заготовки на 180° вокруг ее оси. Кантовка ведется вручную через боковые окна методической печи. Важное значение для качества нагрева металла имеет порядок загрузки металла в печь (рядность, расстояние от торца заготовки до стенки печи, заполнение металлом объема печи). Калибровочный стан состоит из пяти двухвалковых клетей. После калибровки трубы охлаждают на двухсекционном охлаждающем столе, где производится маркировка труб. После охлаждения производят правку в правильных машинах.

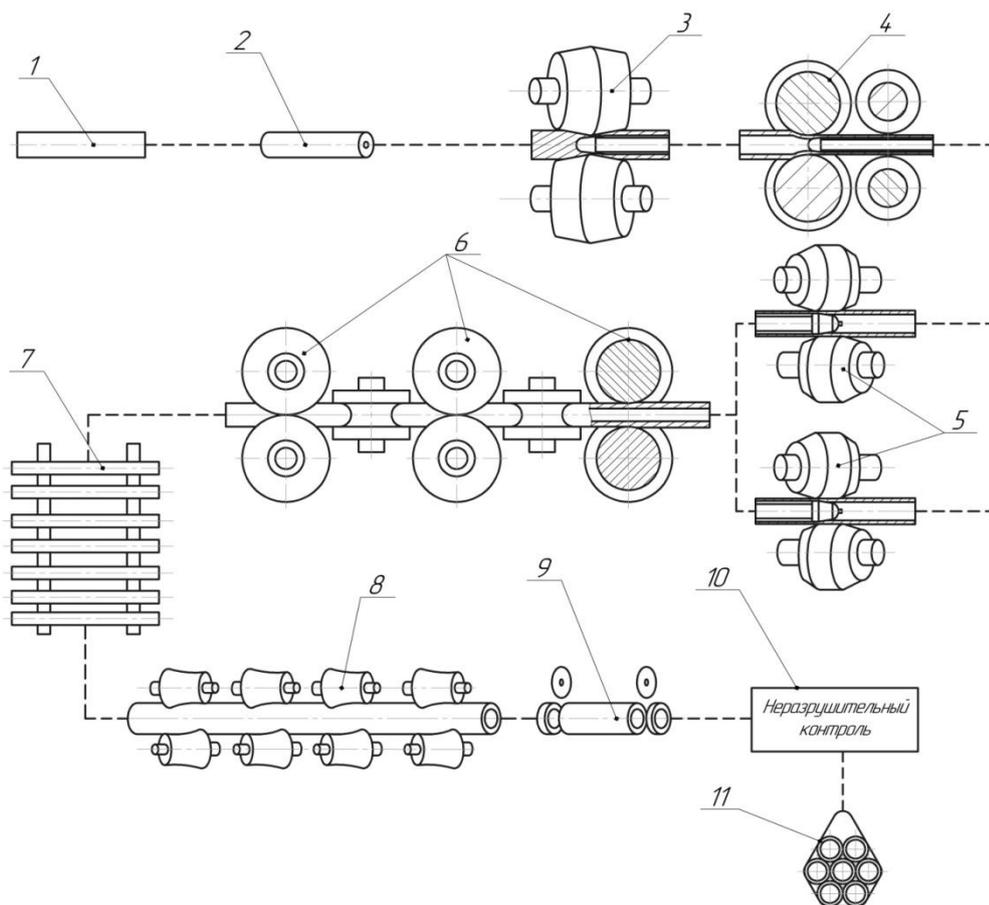
Правка труб осуществляется с целью устранения кривизны и уменьшения овальности поперечного сечения трубы на косовалковом правильном стане [5].



1 – нагрев заготовки, 2 – зацентровка, 3 – прошивка на прошивном стане, 4 – раскатка на автоматическом стане, 5 – обкатка на обкатных станах, 6 – нагрев перед редуцированием, 7 – редуцирование, 8 – охлаждение на охладительном столе, 9 – правка на правильных машинах, 10 – обрезка концов и снятия фасок, 11 – термическая обработка готовых труб, 12 – неразрушительный контроль, 13 – упаковка.

Рисунок 1.4 – Схема прокатки бесшовных труб на трубопрокатном агрегате ТПА 140 с автоматическим станом [5]

По окончании процесса правки, трубы подвергаются порезке на мерные длины и обрезаются концы. Ремонт наружной поверхности труб может производиться такими способами, как шлифовка, обдирка, обточка, травление или электрополировка. Наиболее распространенным в цехе способом ремонта труб является удаление наружных дефектов методом «чеканки» или местного шлифования на станке. Для удаления внутренних дефектов в цехе используются специальные станки для шлифовки внутренней поверхности труб. Отремонтированные трубы вновь направляются на контроль, и процедура осмотра и передача годных труб на склад повторяется. Технологическая схема производства горячекатаных бесшовных труб на агрегате ТПА 220 показана на рисунке 1.5 [5].



1 – нагрев заготовки, 2 – зацентровка, 3 – прошивка на прошивном стане, 4 – раскатка на автоматическом стане, 5 – обкатка на обкатных станах, 6 – калибровка на калибровочном стане, 7 – охлаждение на охлаждающем столе, 8 – правка на правильных машинах, 9 – обрезка концов и снятия фасок, 10 – неразрушительный контроль, 11 – упаковка.

Рисунок 1.5 – Схема прокатки бесшовных труб на трубопрокатном агрегате ТПА 220 с автоматическим станом [5].

1.2 Анализ влияния калибровок технологического инструмента на качественные показатели труб (дефекты поверхности, поперечная и продольная разностенность, кривизна труб)

Качество труб определяется условиями деформации, которые в первую очередь зависят от калибровки технологического инструмента с учетом износа, режимов деформации, типа применяемой смазки.

К проблеме повышения качества труб необходимо подходить комплексно, рассматривая возможность повышения качества на каждом стане трубопрокатного агрегата, с учетом их взаимного влияния на условия формоизменения.

1.2.1 Прошивной стан

Выбору рациональной калибровки инструмента прошивного стана винтовой прокатки посвящена обширная литература на протяжении всего развития способа винтовой прошивки, что, однако не устранило значительного многообразия калибровок валков, линеек, оправок прошивных станом различных агрегатов.

Особенностью винтовой прокатки является многоцикловый характер нагружения металла, где обжатие в данном цикле зависит от обжатий и течения металла в предыдущих. Величины обжатий характеризуют все параметры процесса (исчерпание пластичности, энергосиловые характеристики, условия вращения и осевого перемещения металла, коэффициенты скорости и др.). На существующих прошивных станом задача построения калибровки состоит в реализации системы обжатий, определяющей деформационный режим прошивки. Специфической особенностью винтовой прошивки являлось самопроизвольное вскрытие полости, ведущее к появлению дефектов в виде плен на внутренней поверхности гильз. Поэтому совершенствование калибровки велось по пути, способствующему повышению прошиваемости (снижению склонности к образованию дефектов) и касалось входной части валков, где прокатывалось сплошное тело и толстостенная гильза.

Проследивая развитие станом винтовой прошивки, можно отметить снижение угла входного конуса до $2\div 4^\circ$, что позволило существенно улучшить первичный и вторичный захват и вести процесс с обжатиями перед носком оправки, не превышающими $4\div 6\%$.

Для сохранения прямолинейности профиля очага деформации, образующей валка придают криволинейную форму. Сокращение длины очага деформации, а, следовательно, и количества циклов деформации может быть достигнуто за счет гребней, позволяющих осуществить заданные общие обжатия на более коротком участке. На некоторых установках применяется калибровка с одним или несколькими обратными гребнями, позволяющие повысить равномерность износа и создать «зону отдыха» (скругления) заготовки в районе носка оправки. Известны калибровки, где по длине входного конуса имеются несколько «зон отдыха», что существенно снижает овализацию при прокатке сплошного тела.

Общим для процесса винтовой прошивки является деление очага деформации на участки первичного захвата заготовки, вторичного захвата, раскатки стенки гильзы и калибрования гильзы по толщине стенки и диаметру.

Экспериментальными исследованиями и расчетами [6] показано, что участок прокатки на оправке характеризуется наибольшими энергозатратами, наибольшими действительными частными обжатиями стенки (до 60%). При заполнении очага деформации резерв тянущих сил на этом участке наименьший, в результате чего происходит снижение шага осевой подачи.

Высокие значения обжатий в каждом цикле приводят к разрушению гильзы в случае пришивки заготовки из малопластичных сталей. При исследовании морфологических особенностей разрушений гильз из стали ЭИ 488 (10X17H13M2T по ГОСТ 5632–72 [7]), прокатанных на ТПА 140 и 220 были отмечены следующие особенности:

- большинство дефектов (до 80%) расположены на передних концах труб;
- на наружной поверхности труб $\text{Ø}83 \times 8 \div 10$ на переднем конце имеются глубокие вырывы металла, при этом разрушение может проходить через всю толщину стенки;
- наиболее распространенным видом разрушения является расслоение около внутренней поверхности, которое переходит в дефекты внутренней поверхности;
- на поверхности расслоений присутствуют следы значительных сдвиговых деформаций [8].

Отметим некоторые особенности влияния контактных условий при прошивке гильз из углеродистых и высоколегированных нержавеющей сталей. Контакт прокатываемого металла с короткой оправкой происходит по ювенильной поверхности при высоких значениях давлений и температуры. Разделительный слой на контакте металла с оправкой при прошивке углеродистых сталей преимущественно содержит окислы железа, имеющие температуру плавления близкую к температуре прокатки. Они служат хорошим разделительным слоем между инструментом и прокатываемым металлом.

Для высоколегированных нержавеющей, жаростойких и жаропрочных сталей характерно выделение при прошивке на поверхности окислов (например, Cr_2O_3), имеющих температуру плавления более 2000°C и при температурах прошивки, обладающих большой твердостью. Кроме того, объем окислов невелик. При прокатке таких сталей наибольшее значение разрыва скорости может приходиться на внутренние слои металла, о чем свидетельствует описанная выше картина разрушения и появления дефектов трубы.

Одним из существенных факторов, определяющих качество гильз является стойкость оправки, повышение которой позволит улучшить качество заднего конца гильзы.

При износе переднего конца оправки-носика резко возрастает сопротивление осевому движению гильзы, возрастает количество циклов деформации и расклинивающий эффект действия оправки. Налипание прокатываемого металла на боковую поверхности оправки, как правило также приводит к порезам и др. дефектам внутренней поверхности.

Таким образом совершенствование калибровки рабочего инструмента должно вестись в направлении:

- снижения обжатия сплошного тела до носка оправки;
- снижения действительных частных обжатий на раскатном участке прошивки;
- повышение стойкости оправки, в первую очередь передней ее части;

- использование смазки как разделительного слоя между оправкой и прокатываемым металлом.

1.2.2 Геометрические параметры процесса винтовой прокатки

Выяснение особенностей прокатки в станах винтовой прокатки невозможно без анализа геометрического построения очага деформации. Этой проблеме посвящен ряд исследований [9-14], позволивших решить важные технологические задачи.

Однако некоторые вопросы теории винтовой прокатки остаются до сих пор неразрешенными, что в значительной мере связано с особенностью геометрического построения процесса. К таким вопросам относятся прежде всего теоретическая разработка эффективных калибровок валков, построение рациональных конструкций станов и их узлов в зависимости от назначения, определение методов настройки оборудования и др. В настоящее время эти вопросы решаются либо путем накопления и анализа практических данных, либо проведением дорогостоящих и затяжных экспериментальных работ.

Основной недостаток имеющихся исследований – то, что они рассматривают не общий случай винтовой прокатки как процесса, обусловленного действием поверхности инструмента, определено расположенной в пространстве относительно оси изделия, а конкретные случаи (например, прошивку на реальных прошивных станах). Хотя это и дает возможность уловить частные закономерности процесса в каждом его отдельном конструктивном оформлении, но не раскрывает его общих закономерностей. Кроме того, в большей части работ поверхность основного рабочего инструмента обычно задана (конус в прошивных станах), что не позволяет ставить вопрос об оптимальном процессе, так как условия его уже определены формой и расположением инструмента относительно оси прокатки. Окончательные решения в указанных работах даются или уравнением 4-й степени или более простыми приближенными зависимостями. Но обе эти формы непригодны для теоретического анализа: первая – из-за сложности, а вторая – из-за приближенности решений.

В исследовании геометрии очага деформации в процессе винтовой прокатки прежде всего важно знание кратчайшего расстояния от поверхности валка до оси заготовки в каждом нормальном к оси заготовки сечении. Совокупность таких расстояний вдоль оси прокатки представляет собой калибр при винтовой прокатке. Кратчайшее расстояние от поверхности валка до оси прокатки в настоящее время можно определить графическим методом, используя компьютерную программу «КОМПАС 3Д». Программа показывает достаточно точные значения, как при больших, так и при малых углах подачи и единственным недостатком данной методики определения геометрических параметров очага деформации является высокая трудоемкость работы и необходимость наличия дорогостоящего компьютерного обеспечения.

Для этого необходимо построить твердотельную модель и сборку всех деталей в среде программы. Далее необходимо перевести сборочную единицу в чертежный формат в среде «КОМПАС 3Д» и провести прямую линию от оси валка до оси прокатки. Пересечение прямой линии от оси прокатки до оси валка поверхностью валка пометить точкой, откуда будет измеряться расстояние от оси прокатки до поверхности валка. Это расстояние и будет являться «кратчайшим расстоянием» от оси прокатки до поверхности валка. На сегодняшний день альтернативой графическому методу является комплекс новых расчетных пакетов, включающий [15]:

- разработку алгоритма расчёта определения геометрических параметров очага деформации при винтовой прокатке, который реализует методику расчета для трех схем прокатки, чашевидной, грибовидной и бочковидной. Алгоритм расчёта должен содержать комлементарные математические формулы, достаточно точно отображающие в совокупности геометрию и положение в пространстве очага деформации при заданном режиме формоизменения для разработки программного комплекса по определению параметров прокатки на прошивных станах;

- создание универсального программного комплекса определения технологических параметров на станах винтовой прокатки. Программа должна содержать функцию построения схемы очага деформации, а также определять как геометрические параметры гильзы, так и настроечные параметры прошивного стана.

1.2.3 Автоматические станы

Автоматический стан в трубопрокатном агрегате предназначен для утонения стенки и удлинения труб. После автоматического стана стенка трубы, как правило, имеет номинальную толщину. Характерной особенностью прокатки труб в автоматическом стане является значительная величина поперечной разнотолщинности, которая достигает 30÷35%.

Основными причинами ее возникновения на автоматических станах при использовании круглых калибров является: нестабильная кантовка труб перед вторым проходом, износ поверхности ручья валка, неравномерное обжатие, местное охлаждение гильз [16], наличие тормозящих фрикционных сил на поверхности оправки [17] и заполировка нижнего ручья [18]. Наиболее неблагоприятные условия возникают во втором проходе в вершине круглого калибра и усугубляются по мере его износа.

Заданный размер стенки трубы на автоматическом стане обеспечивается в первую очередь калибровкой технологического инструмента и режимами деформации. От калибровки валков автоматического стана зависит не только абсолютная величина разностенности, но и

характер ее распределения в поперечном сечении труб, который во многом определяет условия деформации в обкатном стане.

Однако, в известных исследования [19] не учитывается влияние закона распределения неравномерности деформации трубы в поперечном сечении, обусловленный калибровкой валков автоматического стана, на условия последующей обкатки в стане винтовой прокатки. В ряде работ [20, 21] критерием оценки оптимальности параметров калибра считают условия захвата гильзы-трубы валками наряду с максимально допустимыми коэффициентами деформации, обеспечивающими минимальную поперечную разностенность.

В работе [19] авторы предлагают за основной принцип конструирования калибров принимать условие, при котором «суммарная» напряженность профиля по периметру постоянна, при этом показателем напряженности профиля выбирается «естественный» коэффициент вытяжки.

1.2.4 Особенности производства горячекатаных бесшовных труб на автоматическом стане ТПА 220

Горячая прокатка бесшовных труб широкого сортамента из углеродистых, легированных и высоколегированных сталей на ТПА 220 с автоматическим станом включает: нагрев в печи, прошивку, раскатку на автоматическом стане, обкатку на обкатных машинах, калибровку и правку [22, 23].

Ключевую роль в эффективности технологической линии производства играет операция раскатки гильзы в трубу с заданной толщиной стенки на автоматическом стане. Прокатка гильзы, поступающей в автоматический стан, выполняется на удерживаемой короткой оправке в два, а иногда в три последовательных прохода с реверсом и кантовкой заготовки после каждого из них. Кантовка (поворот трубной заготовки после предыдущего прохода) осуществляется преимущественно на угол, близкий к 90°. В первом проходе металл, затекающий в область выпусков, образует местные утолщения стенки, раскатываемые после поворота трубы на угол кантовки. Особенностью настройки прокатного инструмента является выбор необходимой высоты калибра, при которой зазоры между рабочими валками достигают 3÷5 мм. Овальность калибра (отношение ширины к его высоте) при прокатке тонкостенных труб принимают 1,04÷1,06 [3]. Оправка состоит из двух основных участков: конического и цилиндрического, объединённых радиусным переходом. При этом длина цилиндрического участка не превышает 35 мм.

Широкое распространение использования в различных странах мира трубопрокатных агрегатов, включающих автоматический стан, связано с известными достоинствами, а именно: с высокой маневренностью перехода на другой типоразмер прокатываемых труб,

универсальностью по возможному соотношению диаметров к толщине стенки (от $4\div 5$ до $40\div 45$ мм), относительно высокой производительностью. Однако дальнейшего решения требуют задачи повышения качества наружной и внутренней поверхности, точности геометрии производимой продукции, снижения расходного коэффициента металла [24].

Отдельного внимания требуют особенности производства тонкостенных труб. Практикой установлено, что прокатка труб на автоматическом стане при соотношении наружного диаметра к толщине стенки свыше 25 ($D/S > 25$) сопровождается образованием дефекта на заднем конце трубы в виде высокой продольной складки. Данная складка, по форме напоминающая «плавник» (рис. 1.6), образуется в области разъёма калибра на концевом участке трубы [24]. Складки могут вызвать трудности при обкатке черновых труб на обкатных машинах [25].

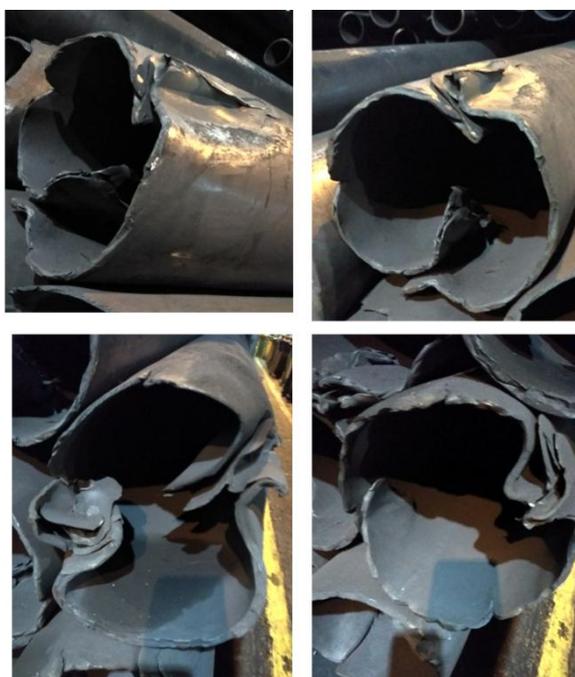


Рисунок 1.6 – Готовые трубы с концевыми складками

Во втором проходе после кантовки трубной заготовки на 90° образуются повторные складки, размеры которых по длине и высоте возрастают по отношению к первичным. Дефектные участки распространены на длину более 500 мм. Последующая раскатка концевых участков на обкатных машинах сопровождается глубокими вмятинами и сквозными, преимущественно продольными, трещинами, уменьшающими выход годного.

Образование складок сопровождается значительным повышением усилий прокатки на всех последующих операциях.

В технологической линии ТПА 220 установлены параллельно два обкатных стана. Групповой приводной механизм каждого из них включает 6-ступенчатый редуктор, выходные валы которого универсальными шпинделями соединены с рабочими валками.

Нагруженные узлы и детали привода обкатных станов в виде крутящих моментов на универсальных шпинделях характеризуется двумя основными уровнями: значениями в установившемся процессе и пиковыми нагрузками при прокатке задних концов черновой трубы в условиях образования складок. При этом величина пиковых нагрузок в 3,5–5,2 раза превышает уровень энергосиловых показателей установившегося процесса прокатки.

При образовании складок (плавников) на концевых участках труб $\text{Ø}245 \times 8,9$ из стали ДБ ток якорной обмотки главного электродвигателя обкатного стана достигает уровня отсечки (1920 А). При этом в установившемся режиме уровни нагрузок не превышает 400 А, что соответствует 32% номинального значения (1240 А).

Учитывая вышеупомянутые недостатки в технологии прокатки на автоматическом стане, актуальной задачей является минимизация образования концевых складок на черновых трубах.

С целью решения поставленной задачи необходимо выполнить следующие этапы работы:

- изменить конструкцию оправочного узла, снабдив его дополнительной втулкой;
- рассчитать параметры процесса прокатки на автоматическом стане;
- для уточнения расчетных параметров выполнить моделирование прокатки в среде «QForm»;
- проанализировать полученные результаты [25].

1.3 Дефекты на наружной и внутренней поверхности гильз

Обоснованием ведения процесса с предварительным образованием полости перед носком оправки служили работы Кокса [10], Зибеля [24] и других зарубежных ученых.

Расширение сортамента и необходимость получения качественных труб из легированных и высоколегированных марок сталей требовали пересмотра установленных принципов ведения процесса прошивки.

Такое усовершенствование процесса базировалось на работах советских ученых и инженеров: И. А. Фомичева [26, 27], В. В. Швейкина [28], В. С. Смирнова [29], И. В. Дубровского и Л. И. Матлахова [30], А. Ф. Лисочкина [31], П.Т. Емельяненко, И.Н. Потапова и П.И. Полухин [32, 33], П. К. Тетерина [34], Б. А. Романцев [3] и др.

1.3.1 Дефекты труб, связанные с разрушением металла при прошивке

Процесс винтовой прокатки характеризуется наличием растягивающих напряжений в различных зонах очага деформации. Поэтому качественные гильзы и трубы могут быть получены только при высоком качестве исходной трубной заготовки. Часть дефектов при прошивке связана непосредственно с пороками заготовки: наружные плены, разрывы заготовки в стане из-за наличия заворота корочки и др. Другая часть дефектов связана с разрушениями металла при прошивке, обусловленными в основном низкой пластичностью металла по всему объему заготовки либо в отдельных ее зонах из-за наличия ликвации, неметаллических включений, пористости и др.. Уменьшение количества дефектов, образующихся в результате разрушений при прошивке, может быть достигнуто применением оптимальной технологии ведения процесса. Рассмотрим основные из указанных дефектов.

Плены и трещины на внутренней поверхности гильз являются наиболее распространенным видом брака и связаны с центральным разрушением металла (полостью) перед носком оправки (рис. 1.7), либо на самой оправке (рис. 1.8)

Случаи образования трещин и плен на оправке редки. Они имеются при прошивке заготовок из металла с низкой пластичностью в гильзы с особо толстыми стенками при большом коэффициенте овализации, а также при резком снижении пластичности металла в процессе прокатки.

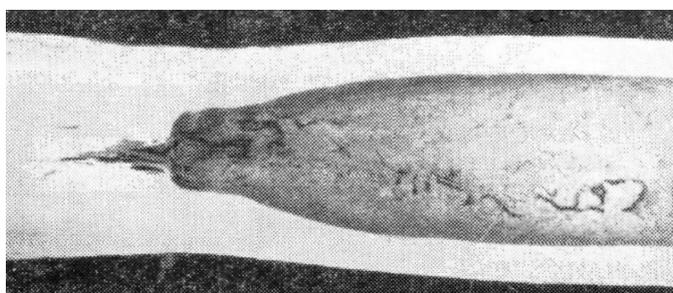


Рисунок 1.7 – Внутренние плены при прошивке с центральным разрушением перед носком оправки (сталь 12Х1МФ по ГОСТ 20072–74 [35]) [36]

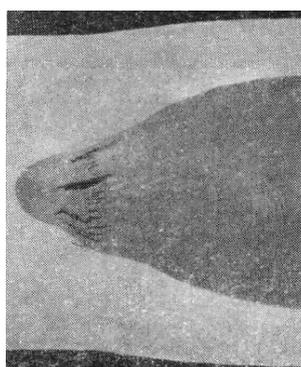


Рисунок 1.8 – Разрушение металла в зоне деформации на оправке [36]

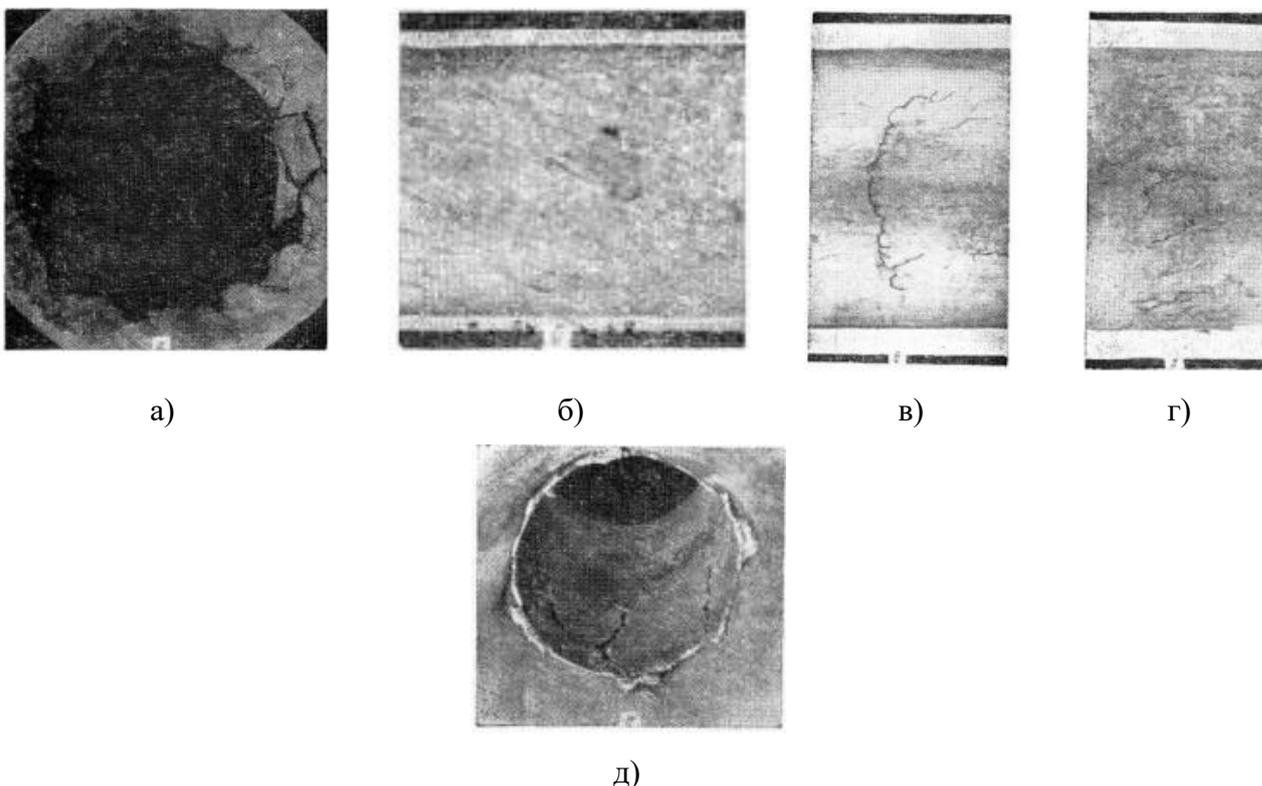


Рисунок 1.9 – Разрушение гильз и дефекты на внутренней поверхности труб (сталь 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632–72 [7]), вызванные перегревом металла (а), нестабильностью вторичного захвата (б), центровкой заготовки (в, г), повышенной овализацией при прошивке заднего конца заготовки (д) [36]

Плены и трещины на гильзах могут быть вызваны: перегревом металла (рис. 1.9, а); повышенным обжатием у носка оправки (рис.1.7); нестабильным вторичным захватом заготовки (замедленным заполнением очага деформации), сказывающемся на качестве передних концов труб (рис. 1.9, б); неудовлетворительной центровкой заготовки (рис.1.9, в, г) и специфическими условиями деформации при прошивке заднего конца заготовки (повышенной овализацией в сечении носка оправки), особенно при получении толстостенных гильз (рис.1.9, д).

Исследование макроструктура показывает, что трещины являются радиально направленным разрушением; плены – это также радиальные трещины, раскатанные при значительной деформации. Трещины и плены располагаются под определенным углом к оси гильзы, соответствующем скручиванию продольных волокон заготовки при прошивке.

Исследование микроструктуры указывает на межкристаллитный характер разрушения при перегреве металла. В других случаях образования плен и трещин встречаются разрушения межкристаллитного и транскристаллитного характера.

б) Расслоение металла у внутренней поверхности гильз. В настоящее время основное внимание уделяют исследованию центрального разрушения металла (полости) перед носком

оправки, приводящего к трещинам и пленам на внутренней поверхности гильз. Однако не менее распространенным видом брака является расслоение металла у внутренней поверхности гильз [37].

Этот дефект является результатом либо кольцевого разрушения (кольцевой полости) перед носком оправки, либо разрушения (расслоения) металла при деформации оправке.

Случаи расслоения металла у внутренней поверхности гильз обычны для металла с низкой исходной пластичностью (рис. 1.10) или при резком падении пластичности металла в процессе нагрева и деформации (рис. 1.11).

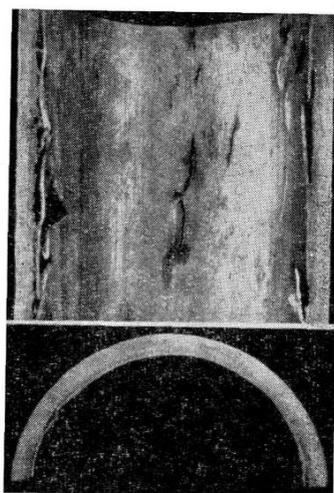
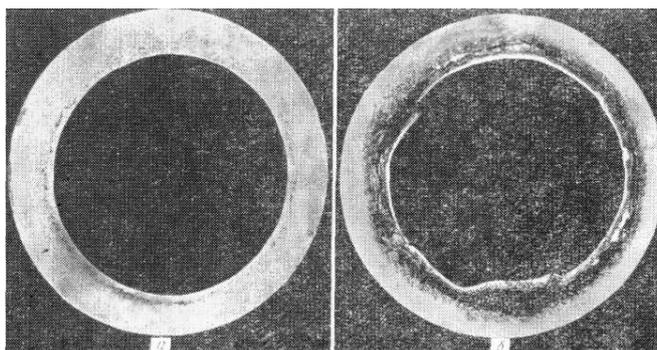


Рисунок 1.10 – Расслоение металла у внутренней поверхности труб из стали марки 06X16H15M3Б по ТУ-14-1-2694-79 [38] [36]



а – прошивка при температуре 1140°C; б – прошивка при температуре 1180°C

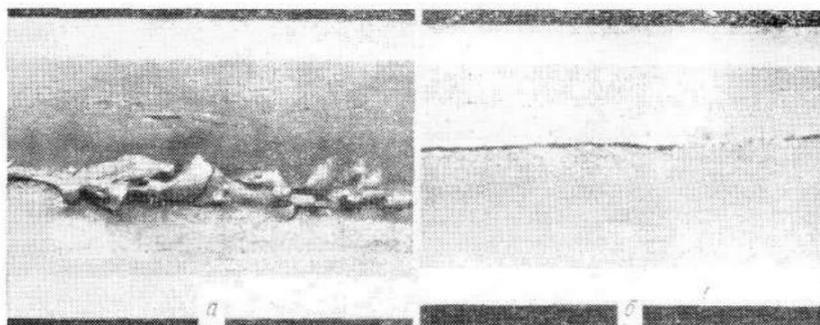
Рисунок 1.11 – Расслоение металла у внутренней поверхности гильз из стали марки ШХ15 по ГОСТ 4727–83 [39] [36]

Расслоение металла у внутренней поверхности гильз часто выявляется только при редуцировании труб или при механической обработке. Оно является опасным, скрытым видом брака. При разрушении внутреннего слоя металла расслоение имеет специфический вид и во

время осмотра труб часто оценивается как внутренняя плена (рис. 1.11, а) или как внутренний порез (рис. 1.11 б). Некоторые исследователи кольцевое разрушение, проявляющееся как расслоение металла у внутренней поверхности труб, смешивают с часто встречающимся на практике расслоением металла у наружной поверхности труб (гильз) [40].

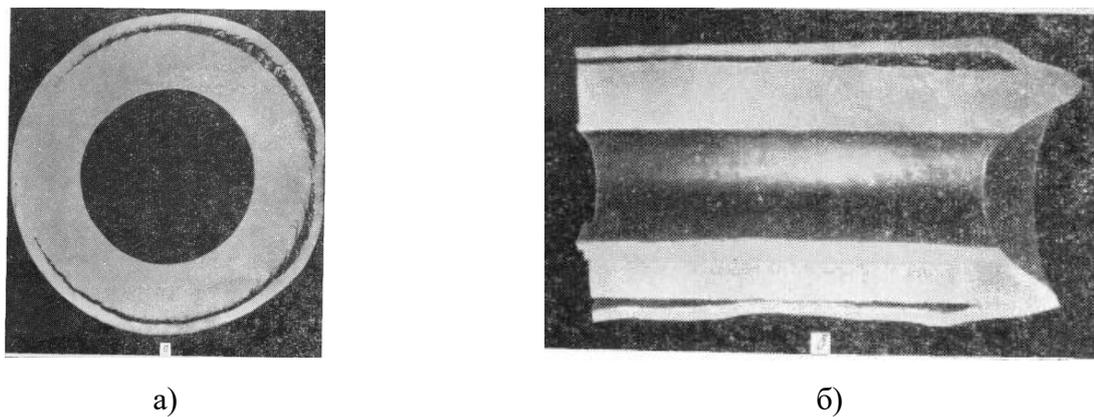
Расслоение металла у наружной поверхности гильз чаще всего встречается при прошивке заготовок большого диаметра с повышенным сопротивлением деформации (рис. 1.14). Весьма склонны к расслоению часто применяемые стали марок 10X17H13M2T по ГОСТ 5632–72 [7] и 20X23H18 по ГОСТ 5632–72 [7]. Для сталей типа 12X18H10T по ГОСТ 5632–72 [7] расслоение обычно образуется при получении гильз из заготовок большого диаметра и практически отсутствует при прошивке заготовок малого диаметра. Как правило, расслоение у наружной поверхности гильз образуется на ее переднем конце во время неустановившегося процесса, реже – одностороннее по длине гильзы или по всей поверхности. Расслоение у наружной поверхности гильзы находится на незначительной глубине порядка $1/5$ толщины стенки, хорошо заметно после прошивки, как потемнение на фоне здорового металла. На трубах расслоения у наружной поверхности могут выявляться при порезке концов. Эти пороки являются опасными, скрытыми видами брака.

Распространенным видом брака являются поперечные надрывы на наружной поверхности гильз, часто образующиеся при прошивке заготовок из высоколегированных сталей, а также в ряде случаев на легированных сталях. Обычно этот вид брака встречается при прошивке заготовок из металла с низкой пластичностью, например из сталей 10X17H13M2T по ГОСТ 5632–72 [7], 20X23H18 по ГОСТ 5632–72 [7] (рис. 1.13). С увеличением диаметра заготовки склонность к образованию надрывов повышается. Место расположения надрывов по длине гильзы может быть самым разнообразным.



а – вида внутренней плены; б – вида внутреннего пореза

Рисунок 1.12 – Расслоение металла у внутренней поверхности труб из стали марки 12X1МФ по ГОСТ 20072–74 [35] [36]



а – в поперечном сечении; б – в продольном сечении

Рисунок 1.13 – Расслоение металла у наружной поверхности гильз из стали типа 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632–72 [7] (показан передний конец гильзы) [36]

Поперечные надрывы заметны непосредственно на прошивном стане (рис. 1.14). При дальнейшей обработке: прокатке гильзы в автоматическом стане, раскатке труб в раскатном стане – надрывы увеличиваются и хорошо заметны на фоне здорового металла. При производстве труб ответственного назначения в случае образования поперечных надрывов трубы ремонтируют или бракуют.

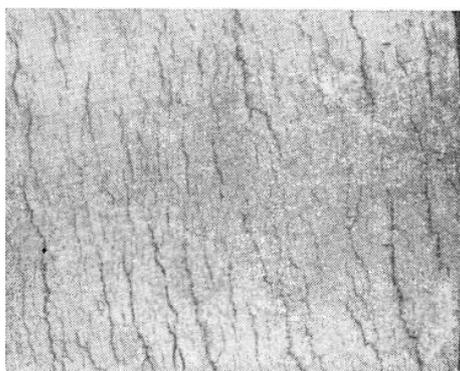


Рисунок 1.14 – Поперечные надрывы на наружной поверхности трубы из стали марки 10Х17Н13М2Т по ГОСТ 5432–72 [41] [36]

Подробный классификатор дефектов горячекатаных бесшовных труб на всех этапах технологического процесса представлен в приложении А.

1.4 Выводы по главе

По итогам литературного обзора сделаны следующие выводы:

1. В процессе изучения технологического процесса производства труб определены ключевые аспекты, влияющие на качество конечной продукции.

2. Были исследованы основные типы станов горячей прокатки бесшовных труб, включая их конструктивные особенности и принципы работы, что способствует лучшему пониманию процессов деформации и контроля качества на этих агрегатах.

3. Исследованы существующие методики расчёта калибровки инструментов и настроечных параметров станов горячей прокатки труб. Установлено, что существующие методы расчёта геометрических параметров очага деформации не обеспечивают достаточной точности, а графические методы, применяемые для определения этих параметров, являются трудоемкими и требуют значительных временных затрат.

4. Проанализированы основные дефекты, возникающие на поверхности горячекатаных бесшовных труб, и установлены причины их образования. Выяснилось, что дефекты чаще всего возникают в процессе винтовой прокатки, что требует разработки новых методов контроля и оптимизации этого процесса.

5. Оказалось, что одной из актуальных задач является повышение точности построения очага деформации, поскольку это может значительно снизить образование дефектов на поверхности горячекатаных бесшовных труб и повысить качество конечной продукции.

Глава 2. Разработка алгоритма расчёта параметров очага деформации при прошивке

2.1 Алгоритм расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке труб на прошивных станах

При прокатке труб в станах винтовой прокатки точность технологических расчётов параметров прокатки труб напрямую влияет на качество производимых труб. В прошивных станах технологическими или настроечными параметрами являются расстояние между валками, линейками или направляющими инструментами, выдвижение оправки, угол подачи, угол раскатки и т. п. В зависимости от изменения технологических параметров прокатки труб изменяются геометрические параметры очага деформации. При неоптимальных настроечных параметрах прошивного стана возникают дефекты, такие как наружные и внутренние плены. Существует много математических моделей и методик расчёта очага деформации в зависимости от настроечных параметров прошивного стана [2, 42–46]. Авторы статей [42, 43] подробно анализировали существующие методы расчёта по определению геометрических параметров очага деформации при прошивке [2, 42–46]. При этом практически каждая из них разработаны под один конкретный тип валков, а также показывают небольшие отклонения [42, 43].

Учитывая недостатки существующих моделей, разработан новый универсальный алгоритм расчёта геометрических параметров процесса прошивки на прошивных станах. Данный алгоритм позволяет рассчитать геометрические параметры очага деформации при прошивке на прошивных станах с бочковидными, чашевидными и грибовидными валками. Основными преимуществами разработанного алгоритма является его гибкость, универсальность и высокая точность по сравнению с существующими математическими моделями и методиками расчёта. Алгоритм показывает достаточно точные геометрические параметры очага деформации даже при больших углах поворота на угол подачи (до 45°) и раскатки (до 45°). Сущность данного алгоритма заключается в определении кратчайшего расстояния от оси прокатки до профиля валка. Адекватность алгоритма проверена с помощью программы «КОМПАС 3D» и фактическими замерами [15].

2.1.1 Новый алгоритм расчёта определения параметров очага деформации

Для технологических расчётов процесса прошивки заготовок требуется достаточно точное значение размеров очага деформации при винтовой прокатке на прошивных станах. При расчёте параметров очага деформации, необходимо учесть следующие факторы: диаметры и

длины участков валка, угол подачи и раскатки, расстояние от торца валка до оси разворота валков на угол подачи.

В данном алгоритме расчёта валок прошивного стана условно делится на три участка: участок до оси, на оси и за осью поворота валков на угол подачи. В алгоритме расчёта угол подачи обозначается символом β , а угол раскатки α (рис. 2.1). При расчете геометрических параметров очага деформации для чашевидных валков угол раскатки имеет значение $\alpha > 0$, при расчете для грибовидных валков $\alpha < 0$ и для бочковидных валков $\alpha = 0$ [15].

Для определения кратчайшего расстояния от оси прокатки до поверхности валка необходимо провести прямую линию от оси валка рассматриваемого участка до оси прокатки. Это расстояние линии обозначается H'_i (рис. 2.2). Расстояние от оси прокатки до рабочей поверхности валка в рассматриваемом участке является «кратчайшим расстоянием» и обозначается h'_i (рис. 2.2).

Расстояние от оси поворота на угол подачи до положения рассматриваемого участка определяется следующим выражением (рис. 2.1).

Если положение рассматриваемого участка находится до или на оси поворота валков на угол подачи, то:

$$k_i = m - \sum l_i$$

где m – расстояние от входного торца валка до оси поворота валков на угол подачи (рис.3.1), мм;

l_i – длина участка валка (рис.3.1), мм;

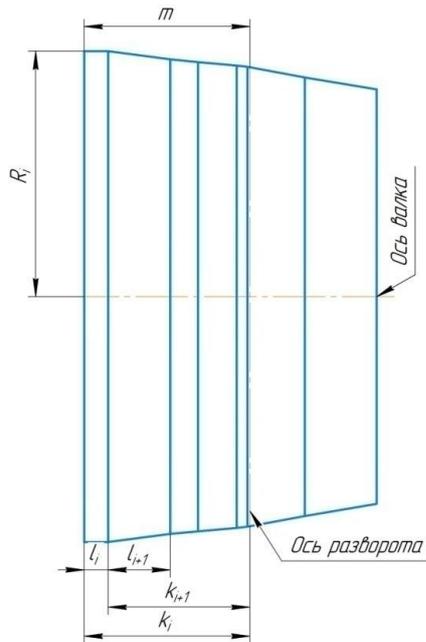
Если положение рассматриваемого участка находится за осью поворота валков на угол подачи, то:

$$k_i = \sum l_i$$

Расстояние от оси прокатки до оси валка по горизонтали рассчитывается по формуле (рис. 2.2):

$$a_i = k_i \cdot \sin \beta$$

где β – угол подачи валков, °.



k_i – расстояние от оси поворота валков до рассматриваемого участка, мм; R_i – радиус валка в рассматриваемом участке, мм.

Рисунок 2.1 – Калибровка чашевидного валка прошивного стана. Вид сбоку [15].

Когда угол подачи и раскатки равны нулю, торец валка образует круг. При изменении значения угла подачи и раскатки торец валка образует эллипс с большой и малой полуосями (рис. 3.2). Угол между большой полуосью эллипса и вертикали определяется следующим выражением ($\alpha > 0$ для чашевидных валков, $\alpha = 0$ для бочковидных валков и $\alpha < 0$ для грибовидных валков) (рис. 2.2) [15]:

При $\alpha > 0$:

$$x_\beta = \tan^{-1} \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \beta}$$

где α – угол раскатки, °

При $\alpha = 0$:

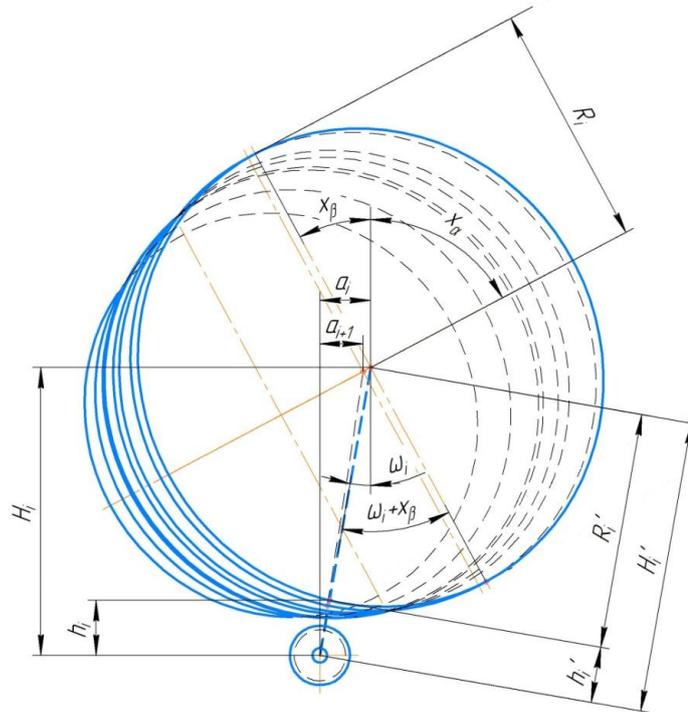
$$x_\beta = 0$$

При $\alpha < 0$:

$$x_{\beta} = \left| \tan^{-1} \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \beta} \right|$$

Угол между малой полуосью эллипса и вертикали определяется следующим выражением (рис. 3.2):

$$x_{\alpha} = 90^{\circ} - x_{\beta}$$



H'_i – расстояние от оси прокатки до оси валка, мм; h'_i – кратчайшее расстояние от оси прокатки до поверхности валка, мм; R'_i – расстояние от оси валка до поверхности валка в рассматриваемом сечении, мм; ω_i – угол между прямой от оси валка до оси прошивки и вертикали, °; H_i – расстояние от оси прокатки до оси валка по вертикали, мм; h_i – кратчайшее расстояние от оси прокатки до поверхности валка по вертикали, мм.

Рисунок 2.2 – Очаг деформации прошивного стана для определения кратчайшего расстояния в рассматриваемом участке. Вид с входного торца валка прошивного стан [15]

Расстояние между осями прокатки и валка по вертикали определяется следующим выражением (рис. 2.2):

Если положение рассматриваемого участка до или на оси поворота на угол подачи, то:

$$H_i = R_0 + k_i \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$$

где R_0 – расстояние от оси прокатки до точки пересечения оси угла подачи и оси валка (рис.2.4), мм

Если положение рассматриваемого участка находится за осью поворота валков на угол подачи, то:

$$H_i = R_0 - k_i \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$$

Угол между прямой от оси валка до оси прошивки и вертикалью определяется следующим выражением (рис. 2.2):

$$\omega_i = \tan^{-1} \frac{a_i}{H_i}$$

Определим коэффициент x_{1-i} , когда положение рассматриваемого участка до или на оси поворота валков на угол подачи (рис. 2.3):

При $\alpha \geq 0$:

$$x_{1-i} = \frac{R_i \cdot \cos(90^\circ - x_\beta - \omega_i)}{\sqrt{\cos(90^\circ - x_\beta - \omega_i)^2 + \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta - \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos(90^\circ - x_\beta - \omega_i)^2}}$$

При $\alpha < 0$:

$$x_{1-i} = \frac{R_i \cdot \cos(90^\circ - x_\beta + \omega_i)}{\sqrt{\cos(90^\circ - x_\beta - \omega_i)^2 + \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta - \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos(90^\circ - x_\beta - \omega_i)^2}}$$

Определим коэффициент x_{1-i} , когда положение рассматриваемого участка находится за осью поворота валков на угол подачи (рис. 3.3):

При $\alpha \geq 0$:

$$x_{1-i} = \frac{R_i \cdot \cos(90^\circ - x_\beta + \omega_i)}{\sqrt{\cos(90^\circ - x_\beta + \omega_i)^2 + \cos \alpha^2 \cdot \cos \beta^2 - \cos \alpha^2 \cdot \cos \beta^2 \cdot \cos(90^\circ - x_\beta + \omega_i)^2}}$$

При $\alpha < 0$ (для грибовидных валков):

$$x_{1-i} = \frac{R_i \cdot \cos(90^\circ - x_\beta - \omega_i)}{\sqrt{\cos(90^\circ - x_\beta + \omega_i)^2 + \cos \alpha^2 \cdot \cos \beta^2 - \cos \alpha^2 \cdot \cos \beta^2 \cdot \cos(90^\circ - x_\beta + \omega_i)^2}}$$

Определим коэффициент x_{2-i} (рис. 3.3):

$$x_{2-i} = \sqrt{R_i^2 - x_{1-i}^2}$$

Определим коэффициент ω'_i (рис. 3.3):

$$\omega'_i = \tan^{-1} \frac{x_{1-i}}{x_{2-i}}$$

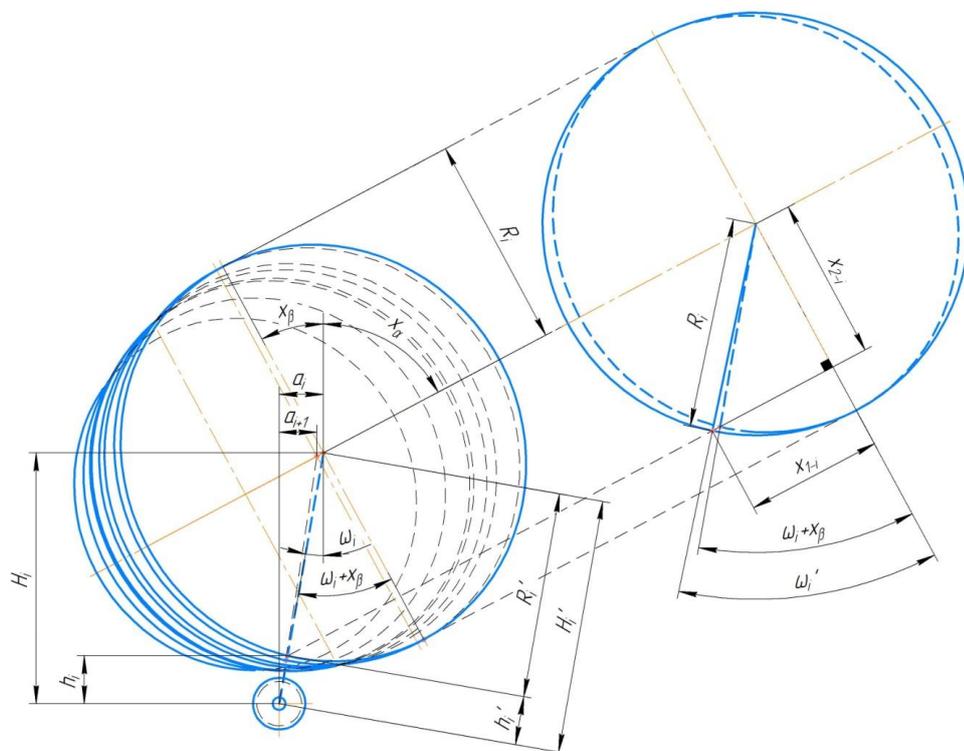


Рисунок 2.3 – Очаг деформации прошивного стана для определения кратчайшего расстояния от оси прошивки до поверхности валка. Вид с торца валка и ее проекция [15]

Расстояние между осью прошивки и осью валка находится следующим выражением (рис. 2.3):

$$H'_i = \frac{H_i}{\cos \omega_i}$$

Расстояние от оси валка до поверхности валка в рассматриваемом сечении R'_i определим следующим выражением (рис. 2.3):

Если положение рассматриваемого участка до оси поворота валков на угол подачи, то R'_i определяется следующим выражением [15]:

При $\alpha \geq 0$:

$$R'_i = R_i \cdot \frac{\cos \omega'_i}{\cos(\omega_i + \alpha)}$$

При $\alpha < 0$:

$$R'_i = R_i \cdot \frac{\cos \omega'_i}{\cos(\alpha - \omega_i)}$$

Если положение рассматриваемого участка находится за осью поворота валков на угол подачи, то R'_i определяется следующим образом:

При $\alpha \geq 0$:

$$R'_i = R_i \cdot \frac{\cos \omega'_i}{\cos(\omega_i - \alpha)}$$

При $\alpha < 0$:

$$R'_i = R_i \cdot \frac{\cos \omega'_i}{\cos(\omega_i + \alpha)}$$

Значение кратчайшего расстояния от оси прокатки до поверхности валка определим следующим выражением (рис. 2.2):

$$h'_i = H'_i - R'_i$$

Расстояние от оси прокатки до поверхности валка по вертикали (рис. 2.2):

$$h_i = h'_i \cdot \cos \omega_i$$

Определим коэффициент $x'_{\delta-i}$ (рис. 2.4):

$$x'_{\delta-i} = \omega'_i - \cos^{-1}(\sin x_\alpha \cdot \cos \alpha)$$

Определим коэффициент x_{5-i} (рис. 2.4):

$$x_{5-i} = R_i \cdot \cos x'_{\delta-i}$$

Определим коэффициент x_{4-i} (рис. 2.4):

$$x_{4-i} = \sqrt{R_i^2 - x_{5-i}^2}$$

Определим коэффициент $x_{\delta-i}$ (рис. 2.4):

$$x_{\delta-i} = \tan^{-1} \frac{x_{4-i} \cdot \sin \beta}{x_{5-i}}$$

Определим коэффициент x_{3-i} , когда положение рассматриваемого участка находится до и на оси поворота валков на угол подачи (рис. 2.4):

При $\alpha \geq 0$:

$$x_{3-i} = (H_i - h_i) \cdot \tan(x_{\delta-i} + \alpha)$$

При $\alpha < 0$:

$$x_{3-i} = (H_i - h_i) \cdot \tan(|\alpha| - x_{\delta-i})$$

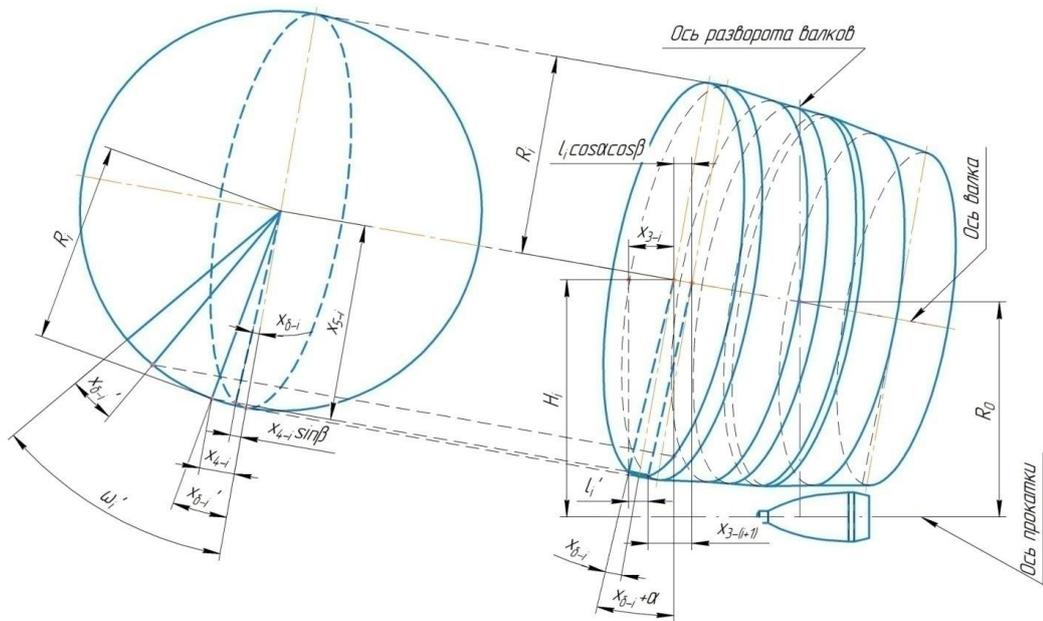


Рисунок 2.4 – Очаг деформации прошивного стана для определения кратчайшего расстояния и ее проекция. Вид справа [15]

Определим коэффициент x_{3-i} , когда положение рассматриваемого участка находится за осью поворота валков на угол подачи (рис. 2.4):

При $\alpha \geq 0$:

$$x_{3-i} = (H_i - h_i) \cdot \tan(\alpha - x_{\delta-i})$$

При $\alpha < 0$:

$$x_{3-i} = (H_i - h_i) \cdot \tan(|\alpha| + x_{\delta-i})$$

Определим длины рассматриваемых участков по нормали следующим выражением (рис. 2.4):

При $\alpha \geq 0$:

$$l'_i = l_i \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta + x_{3-i} - x_{3-(i+1)}$$

При $\alpha < 0$:

$$l'_i = l_i \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta - x_{3-i} + x_{3-(i+1)}$$

Определив геометрические параметры очага деформации процесса прошивки заготовок, построим очаг деформации в виде схемы. Схема построения очага деформации представлена на рисунке 2.5.

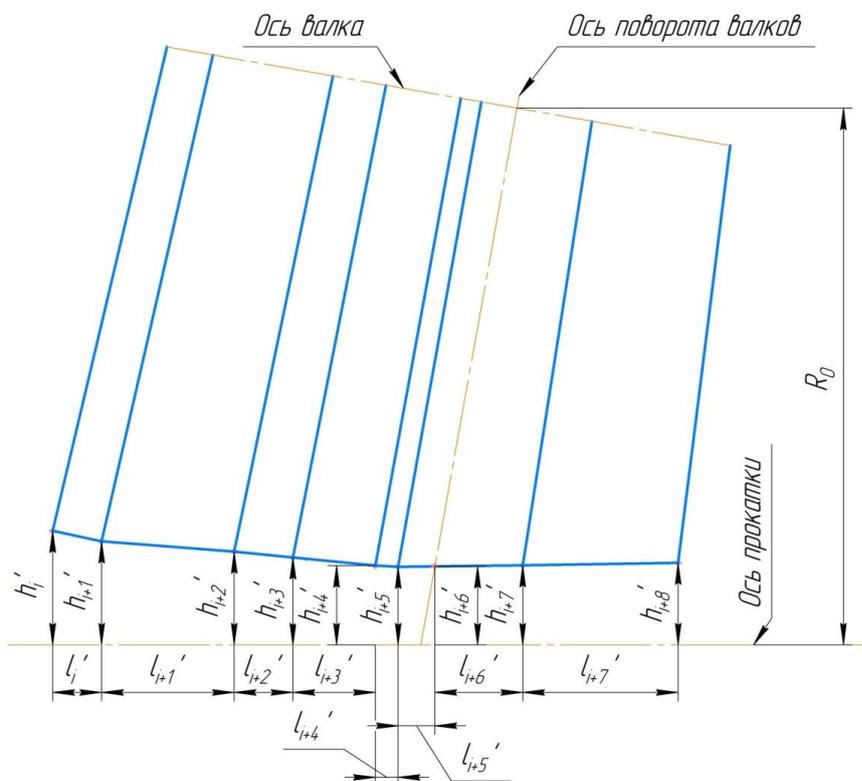
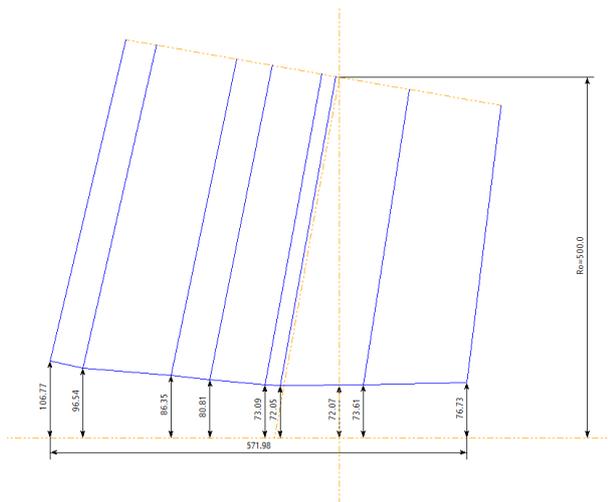


Рисунок 2.5 –Очаг деформации при прошивке труб на прошивном стане с чашевидными валками [15]

Общая блок-схема алгоритма расчёта параметров очага деформации приведена на рисунках В.1, В.2 и В.3 приложения В. В первой части блок-схемы определяются общие коэффициенты и расстояние от оси поворота валков до оси прокатки на угол подачи. Во второй части блок-схемы определяется кратчайшее расстояние от оси прокатки до поверхности рабочего валка, а в третьей части блок-схемы рассчитывается расстояние между зонами.

2.1.2 Сравнительный анализ полученных результатов

Проведен сравнительный анализ результатов расчетов параметров очага деформации, выполненных с использованием разработанного алгоритма, графического метода, а также данных фактических замеров. Итоговые результаты сравнительного анализа представлены в таблицах 2.1, 2.2, 2.3, а также визуализированы на рисунках 2.6, 2.7 и 2.8.



а)

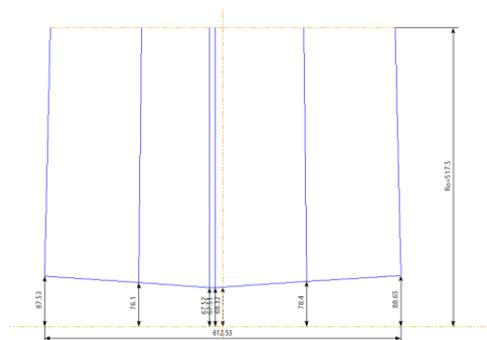
б)

а) 3D модель чашевидного валка построенный в «КОМПАС 3D»; б) профиль валка, полученный по разработанному алгоритму расчёта

Рисунок 2.6 – Геометрические параметры очага деформации чашевидного валка [15]

Таблица 2.1 – Результаты расчёта профиля чашевидного валка

Метод определения	Кратчайшее расстояние от оси прокатки до профиля валка, мм								Длина очага деформации, мм
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	
Фактические замеры	106,8	96,6	86,1	80,3	73,0	72,1	73,8	76,9	572,3
Результаты, полученные по разработанному алгоритму и отклонение от фактических замеров									
Разработанный алгоритм	106,77	96,54	86,35	80,81	73,09	72,05	73,61	76,73	571,98
Отклонение от факт. замеров, %	0,03	0,06	0,29	0,63	0,12	0,07	0,26	0,22	0,06
Результаты, полученные по КОМПАС 3D и отклонение от фактических замеров									
КОМПАС 3D	105,43	94,58	85,30	81,74	74,18	73,43	73,14	76,13	571,14
Отклонение от факт. замеров, %	1,28	2,09	0,92	1,79	1,61	1,84	0,89	1,00	0,20



а)

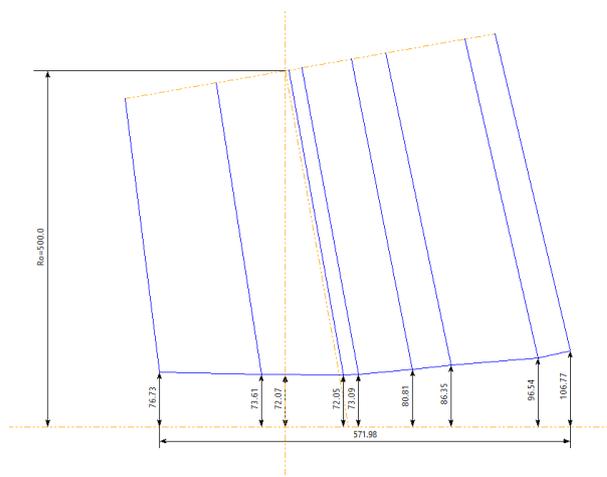
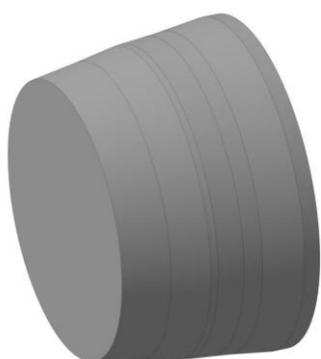
б)

а) 3D модель бочковидного валка построенный в «КОМПАС 3D»; б) профиль валка, полученный по разработанному алгоритму расчёта

Рисунок 2.7 – Геометрические параметры бочковидного валка [15]

Таблица 2.2 – Результаты расчёта профиля бочковидного вала

Метод определения	Кратчайшее расстояние от оси прокатки до профиля вала, мм						Длина очага деформации, мм
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	L
Фактические замеры	87,3	75,9	67,2	67,1	78,2	88,2	612,7
Результаты, полученные по разработанному алгоритму и отклонение от фактических замеров							
Разработанный алгоритм	87,53	76,10	67,52	67,51	78,40	88,65	612,53
Отклонение от факт. замеров, %	0,26	0,26	0,47	0,61	0,25	0,51	0,03
Результаты, полученные по КОМПАС 3D и отклонение от фактических замеров							
КОМПАС 3D	88,01	77,04	68,34	68,56	79,30	89,07	618,45
Отклонение от факт. замеров, %	0,81	1,50	1,69	2,17	1,41	0,98	0,94



а)

б)

а) 3D модель грибовидного вала построенный в «КОМПАС 3D»; б) профиль вала, полученный по разработанному алгоритму расчёта

Рисунок 2.8 – Геометрические параметры очага деформации грибовидного вала

Таблица 2.3 – Результаты расчёта профиля грибовидного вала

Значение	Кратчайшее расстояние от оси прокатки до профиля вала, мм								Длина очага деформации, мм
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	L
Фактические замеры	76,2	73,1	72,3	73,3	81,0	86,7	96,9	106,0	572,5
Результаты, полученные по разработанному алгоритму и отклонение от фактических замеров									
Разработанный алгоритм	76,73	73,61	72,05	73,09	80,81	86,35	96,54	106,77	571,98
Отклонение от факт. замеров, %	0,69	0,69	0,34	0,28	0,23	0,40	0,37	0,71	0,09
Результаты, полученные по КОМПАС 3D и отклонение от фактических замеров									
КОМПАС 3D	77,28	74,57	72,98	73,99	81,88	87,96	97,85	107,97	578,98
Отклонение от факт. замеров, %	1,41	2,01	0,94	0,94	1,08	1,45	1,29	1,85	1,13

Результаты сравнительного анализа демонстрируют, что геометрические параметры очага деформации, рассчитанные с использованием разработанного алгоритма, имеют максимальное отклонение от фактических замеров, равное 0,69%. В то же время данные,

полученные с использованием программы «КОМПАС 3D», показывают максимальное отклонение на уровне 2,17%. Это свидетельствует о более высокой точности разработанного алгоритма в сравнении с применением программы «КОМПАС 3D» для расчёта геометрических параметров [15].

2.2 Разработка программы для ЭВМ «Eisen v2.0» с целью расчёта параметров процесса прошивки

Процесс расчета настроечных параметров и параметров прошивки прошивного стана традиционно является длительным и трудоемким. Однако своевременное получение оптимальных настроечных параметров позволяет значительно снизить вероятность образования дефектов на внутренней и наружной поверхностях труб.

Для решения данной задачи была разработана и реализована компьютерная программа «Eisen v2.0» на основе нового алгоритма расчета. Программа предназначена для определения геометрических параметров очага деформации, расчета настроечных параметров прошивного стана и калибровок инструментов. Применение программы обеспечивает оперативное и высокоточное определение параметров, что способствует улучшению качества прокатываемых труб [15].

Одной из особенностей программы является возможность выполнения расчетов для валков различной формы: бочковидных, чашевидных и грибовидных. Программа разработана на языке программирования «Python 3.9» с интуитивно понятным и удобным интерфейсом, который позволяет технологам и инженерам эффективно решать производственные задачи. Интерфейс программы представлен на рисунке 2.9.

Разработанная программа обладает отличительной особенностью — наличием встроенной базы данных для хранения геометрических параметров рабочих инструментов, включая калибровку валков, оправок и направляющих линеек. Для выбора калибровки валка пользователь может сначала указать ранее сохраненный стан, после чего выбрать необходимую калибровку из доступного списка (рис. 2.10).

После выбора калибровки рабочего валка следующим этапом является выбор соответствующих инструментов, таких как оправка и линейка, которые должны соответствовать ранее выбранной калибровке рабочего валка. Данный шаг обеспечивает точность расчета настроечных параметров прошивного стана и позволяет учитывать взаимодействие всех элементов очага деформации. На рисунках 2.11 и 2.12 представлены примеры интерфейса выбора оправки и линейки.

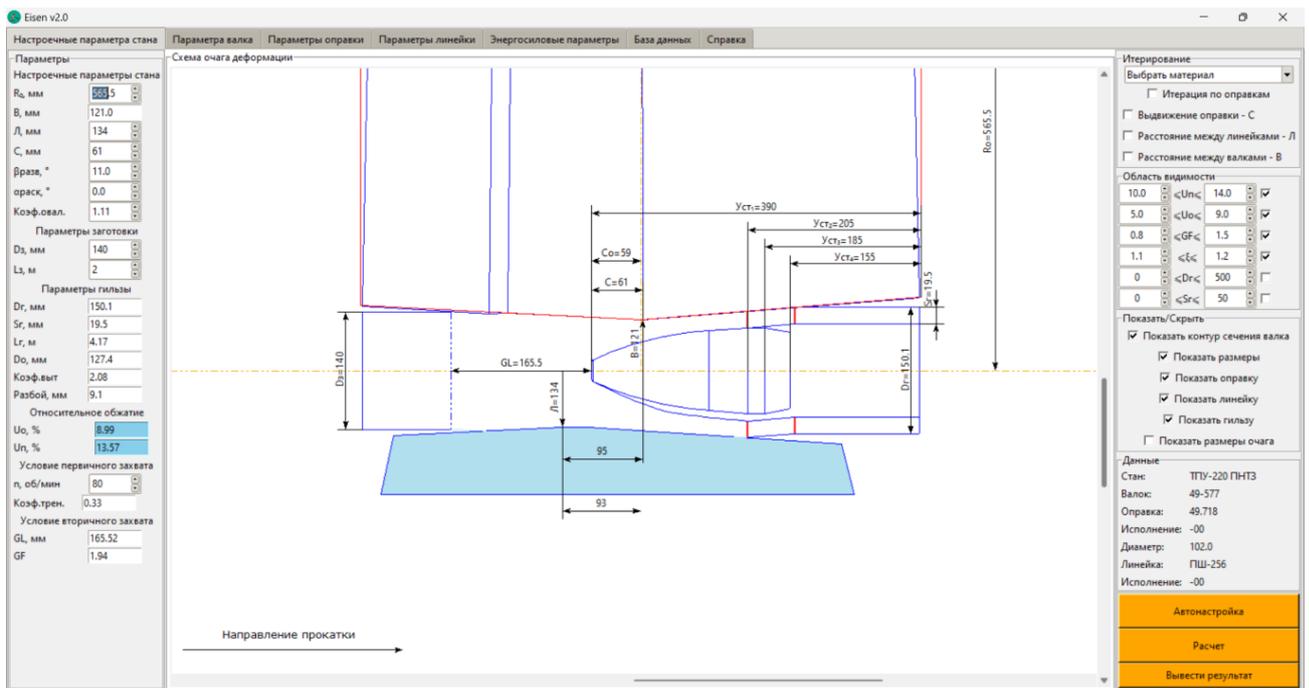


Рисунок 2.9 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Главное окно

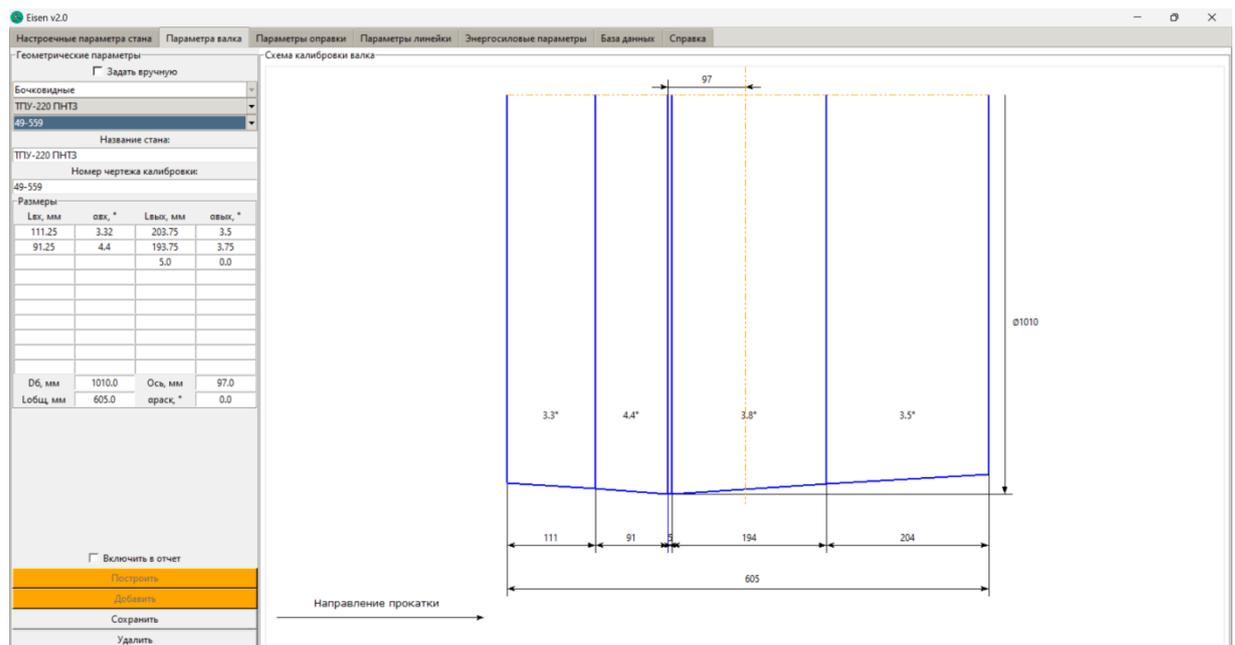


Рисунок 2.10 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Окно выбора параметров рабочего вальца

После выбора необходимых инструментов, таких как оправка и линейка, следует перейти в главное окно программы (рис. 2.9). В этом окне требуется задать исходные настроечные параметры прошивного стана или параметры прошивки, такие как размеры гильзы, величину обжатия и другие ключевые параметры. После ввода данных необходимо нажать на вкладку «Расчет». В результате программа автоматически построит схему очага деформации с отображением всех геометрических размеров (рис. 2.10).

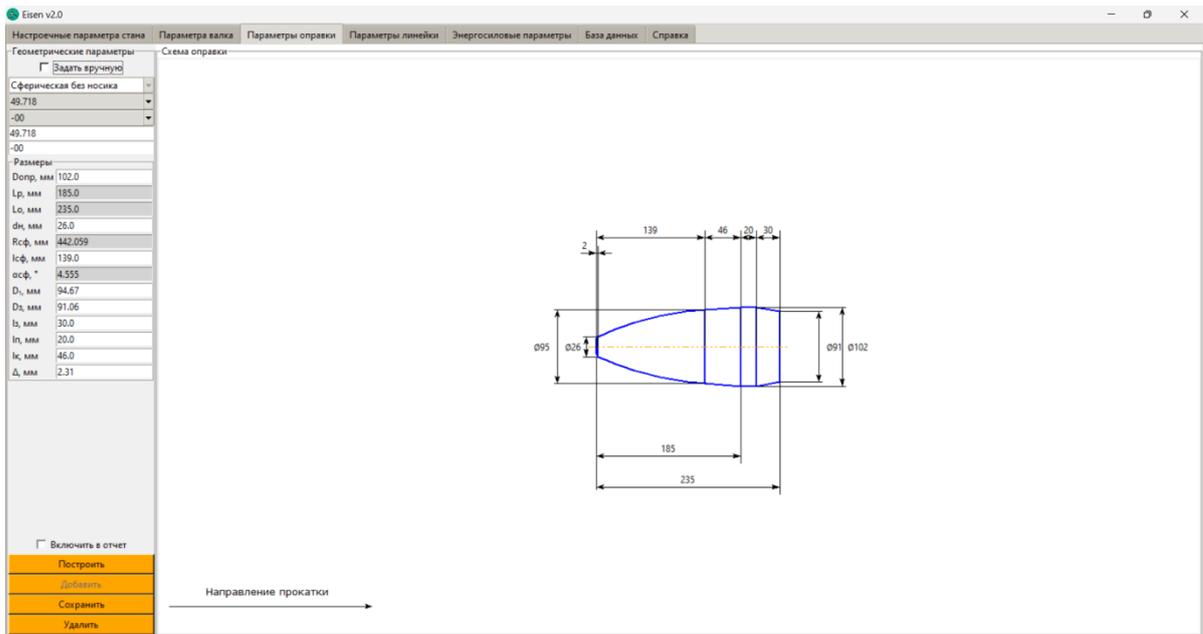


Рисунок 2.11 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Окно выбора параметров оправки

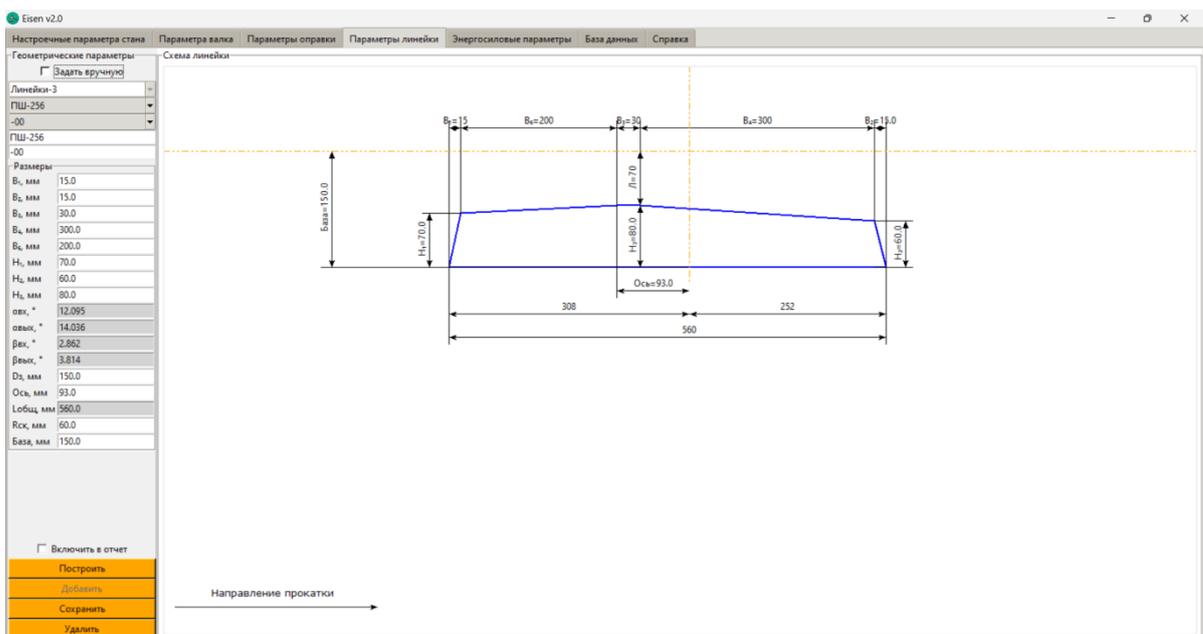


Рисунок 2.12 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Окно выбора параметров направляющей линейки

Одной из ключевых функций программы является возможность выполнения итеративных расчетов. Для этого пользователь может выбрать инструмент, для которого требуется, провести итерацию. В данном случае программа автоматически изменяет настроечные параметры с шагом: 1,0 мм для выдвигания оправки за пережим и расстояния между направляющими линейками, а также 0,5 мм для расстояния между валками. Это

позволяет оперативно подобрать оптимальные параметры настройки прошивного стана и повысить точность расчетов.

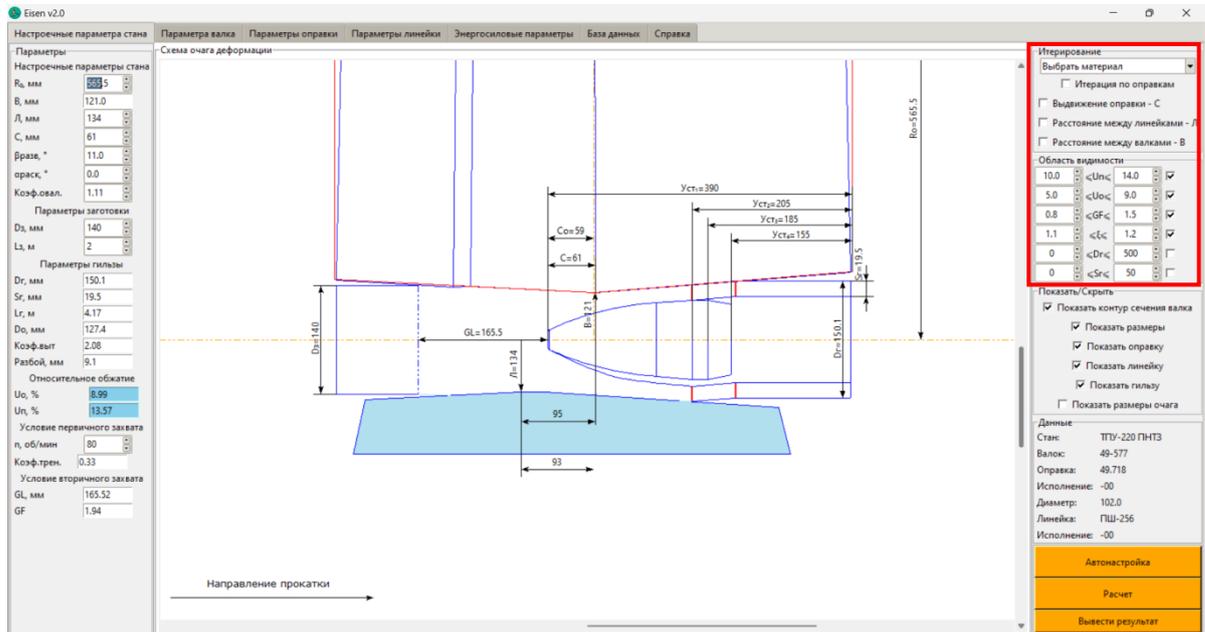


Рисунок 2.13 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Главное окно

После задания параметров и нажатия на вкладку «Расчет» в главном окне программы отображаются все возможные параметры прошивки, которые соответствуют заданным значениям и входят в указанный диапазон (рис. 2.13). Это позволяет пользователю быстро оценить доступные варианты настроек, подходящих для заданных условий работы прошивного стана, и выбрать оптимальные параметры для выполнения технологического процесса.

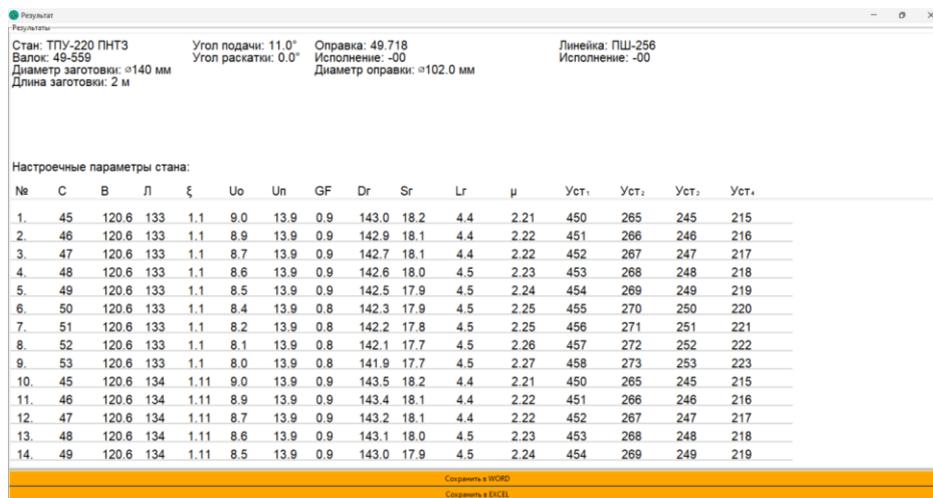


Рисунок 2.14 – Интерфейс программы «Eisenv2.0». Окно выбора полученных результатов после итеративного расчёта

Результаты расчетов могут быть экспортированы в форматах «.xls» или «.docx» для удобства последующего анализа и документирования. Пример таблицы, содержащей полученные настроечные параметры, представлен на рисунках 2.14 и 2.15. Этот функционал позволяет формировать отчетные документы автоматически, экономя время и исключая вероятность ошибок, связанных с ручным вводом данных.

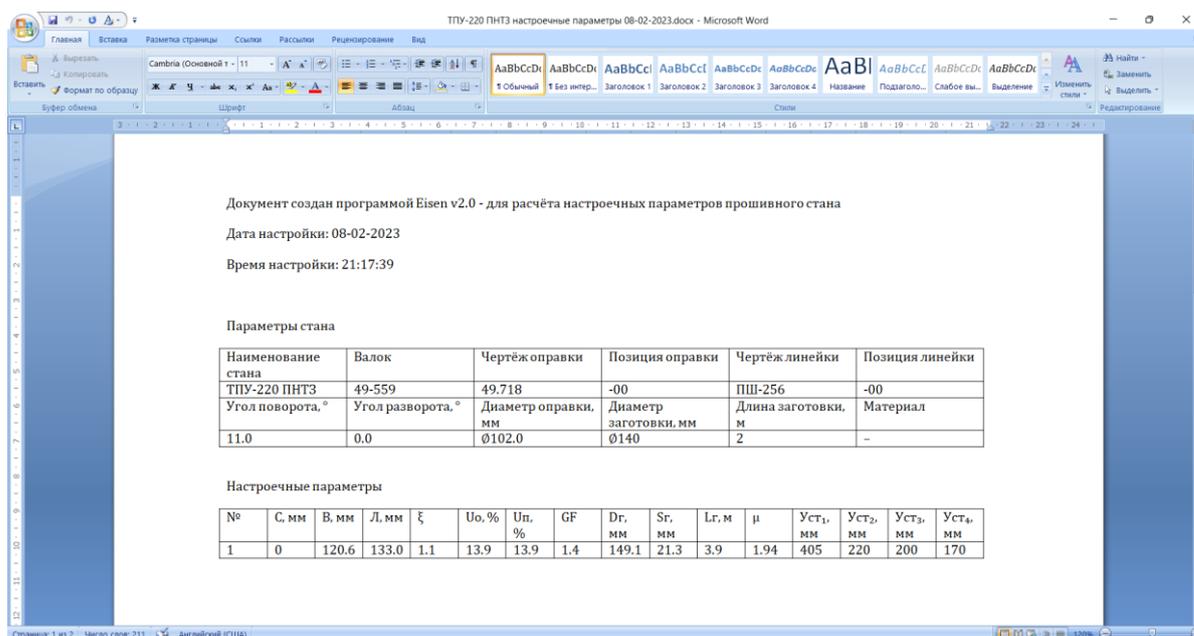


Рисунок 2.15 – Таблица полученных настроечных параметров по результатам расчёта в среде «Eisen v2.0»

Программа предоставляет возможность построить схему с отображением геометрических параметров очага деформации. Для этого в главном окне необходимо выбрать вкладку «Показать размеры очага деформации» и скрыть отображение схемы инструментов и гильзы. Пример построенной схемы представлен на рисунке 2.16. Данная функция позволяет визуально оценить параметры очага деформации, что способствует более точной настройке процесса прошивки.

Эта функция позволяет разрабатывать калибровку не только для прошивного стана, но и для всех типов станов винтовой прокатки. Это значительно расширяет возможности программы, предоставляя универсальные инструменты для настройки различных видов прокатных агрегатов, что способствует улучшению точности и эффективности производственных процессов в металлургической отрасли.

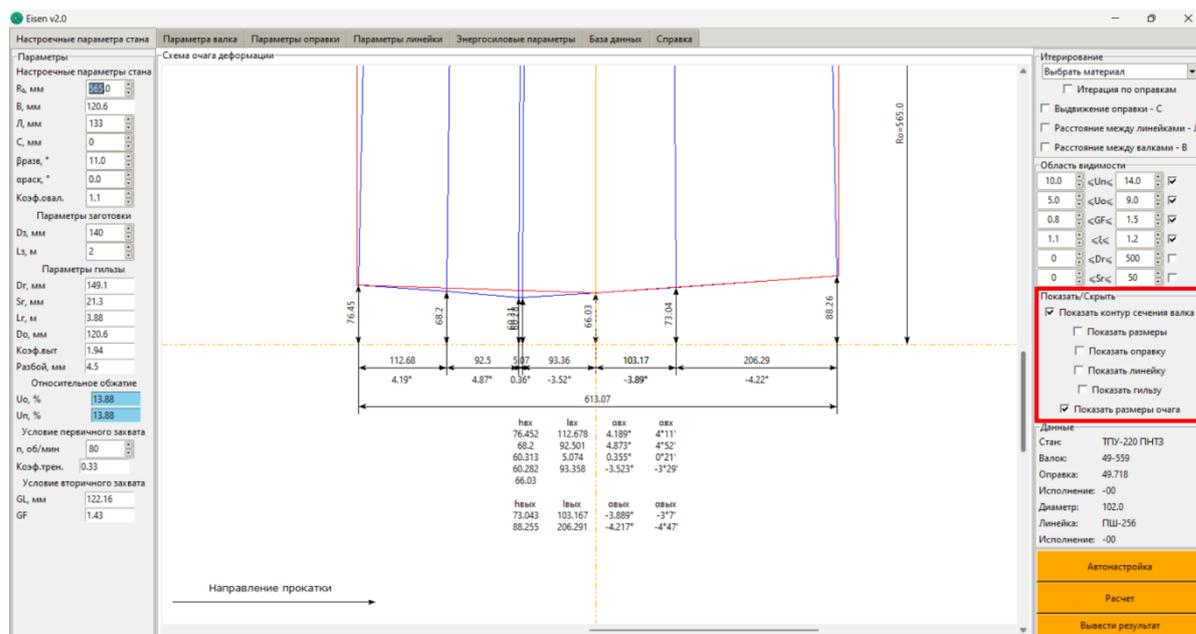


Рисунок 2.16 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Главное окно с геометрическими параметрами очага деформации

2.3 Оценка адекватности результатов программы

Сравнительный анализ выполнен на основе результатов моделирования, проведенного в программных средах «QForm» и «Eisen v2.0». Расчёты осуществлены с использованием калибровок инструментов прошивного стана ТПА 220. В качестве исследуемых объектов выбраны профильные размеры труб $\varnothing 219 \times 14$ и $\varnothing 145 \times 4,5$. Полученные результаты позволили провести детальную оценку точности и эффективности применения разработанной программы в сравнении с промышленно признанным инструментом моделирования.

2.3.1 Моделирование процесса прошивки на ТПА 220 трубы с профилем $\varnothing 219 \times 14$

Исходные данные для моделирования процесса прошивки трубы профильного размера $\varnothing 219 \times 14$ представлены в таблицах 2.4 и 2.5. Эти данные включают параметры настройки прошивного стана и характеристики используемых инструментов, что позволяет детально проанализировать процесс деформации металла и точность прокатки в заданных условиях.

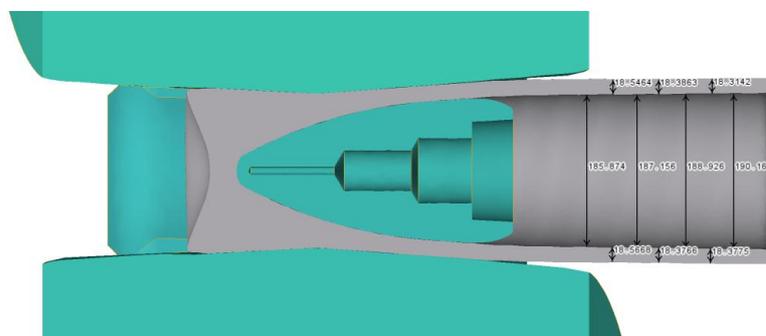
Таблица 2.4 – Исходные параметры расчета

Марка сплава	Температура заготовки, °C	Частота вращения валков, об/мин
40Г	1200	64,5

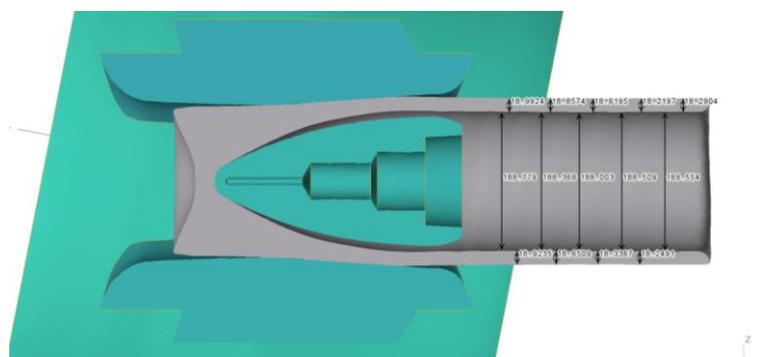
Таблица 2.5 – Настраечные параметры прошивного стана ТПА 220

Диаметр заготовки, мм	Расстояние между валками, мм	Выдвижение оправки за пережим, мм	Расстояние между линейками, мм	Угол подачи, °
215	188,2	98	207	11

Результаты моделирования процесса прошивки трубы профильного размера $\text{Ø}219 \times 14$ представлены на рисунке 2.18 а) и б).



а) Процесс прошивки в среде «QForm». Вид сверху в сечении



б) Процесс прошивки в среде «QForm». Вид сбоку в сечении

Рисунок 2.17 – Моделирование процесса прошивки в среде «QForm» трубы с профилем $\text{Ø}219 \times 14$ [47]

Результаты расчёта геометрических параметров процесса прошивки на стане ТПА 220 приведен приведен на рисунке 2.18.

Результаты расчёта геометрических параметров процесса прошивки на стане ТПА 220, выполненного с использованием разработанной программы «Eisen v2.0», представлены на рисунке 2.18.

Отклонения по диаметру и толщине стенки гильзы, полученные в результате расчётов, составили 0,43% и 0,069% соответственно (табл 2.6), что подтверждает высокую точность разработанной программы.

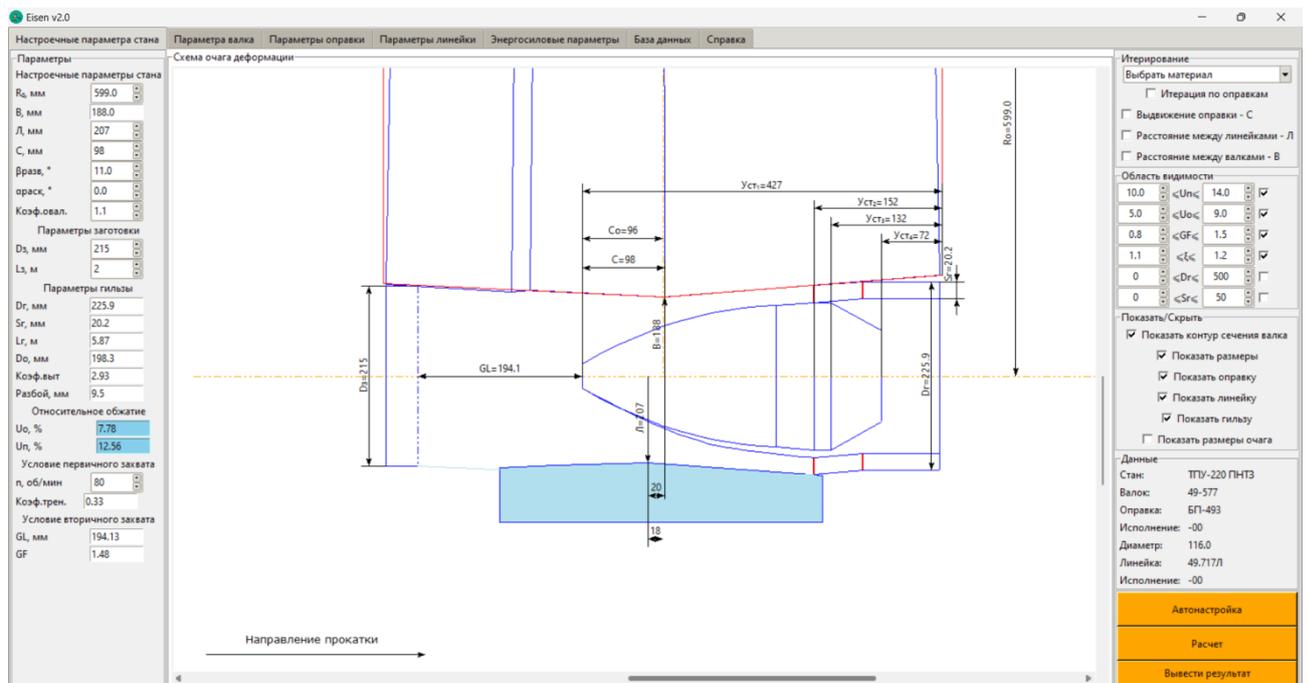


Рисунок 2.18 – Результаты расчёта параметров прокатки в среде «Eisen v2.0» трубы с профилем $\text{Ø}219 \times 14$ [47]

Таблица 2.6 – Полученные результаты по итогам расчетов

Наименование	Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм
«QForm»	225,376	18,713
«Eisen v2.0»	224,4	18,7
Отклонение, %	0,43	0,069

2.3.2 Моделирование процесса прошивки на ТПА 220 трубы с профилем $\text{Ø}159 \times 4,5$

Исходные данные для моделирования процесса прошивки трубы профиля $\text{Ø}145 \times 4,5$ приведены в таблицах 2.7 и 2.8.

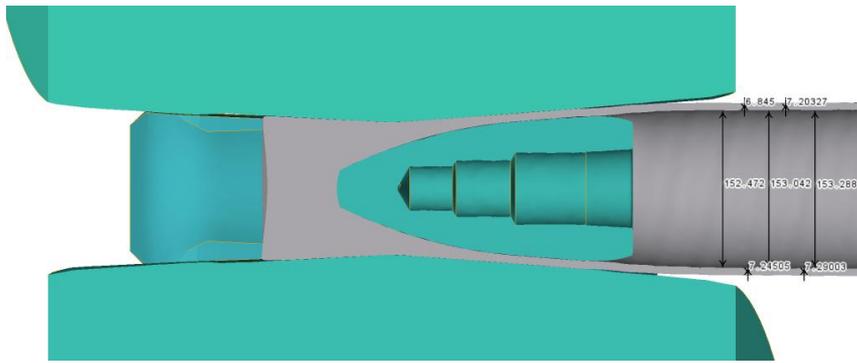
Таблица 2.7 – Исходные параметры расчета

Марка сплава	Температура заготовки, °С	Частота вращения валков, об/мин
40Г	1200	64,5

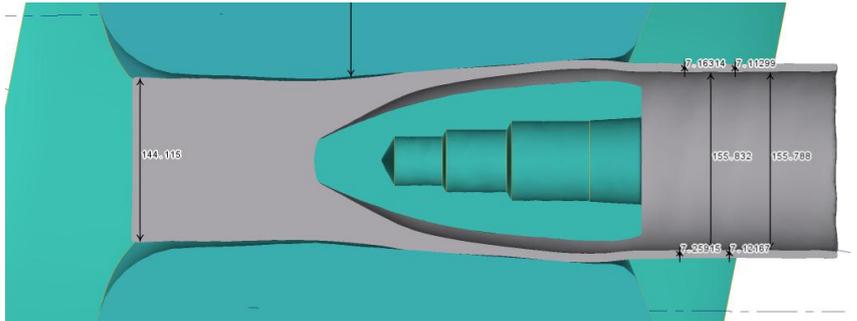
Таблица 2.8 – Настраечные параметры прошивного стана ТПА 220

Диаметр заготовки, мм	Расстояние между валками, мм	Выдвижение оправки за пережим, мм	Расстояние между линейками, мм	Угол подачи, °
145	128	55	144	11

Результаты моделирования показаны на рисунке 3.19 а) и б).



а) Процесс прошивки в среде «QForm». Вид сверху в сечении



б) Процесс прошивки в среде «QForm». Вид сбоку в сечении

Рисунок 2.19 – Моделирование процесса прошивки в среде «QForm» трубы с профилем $\text{Ø}159 \times 4,5$ [47]

Результаты расчёта геометрических параметров процесса прошивки для стана ТПА 220, выполненного в программе «Eisen v2.0», представлены на рисунке 2.20 [47].

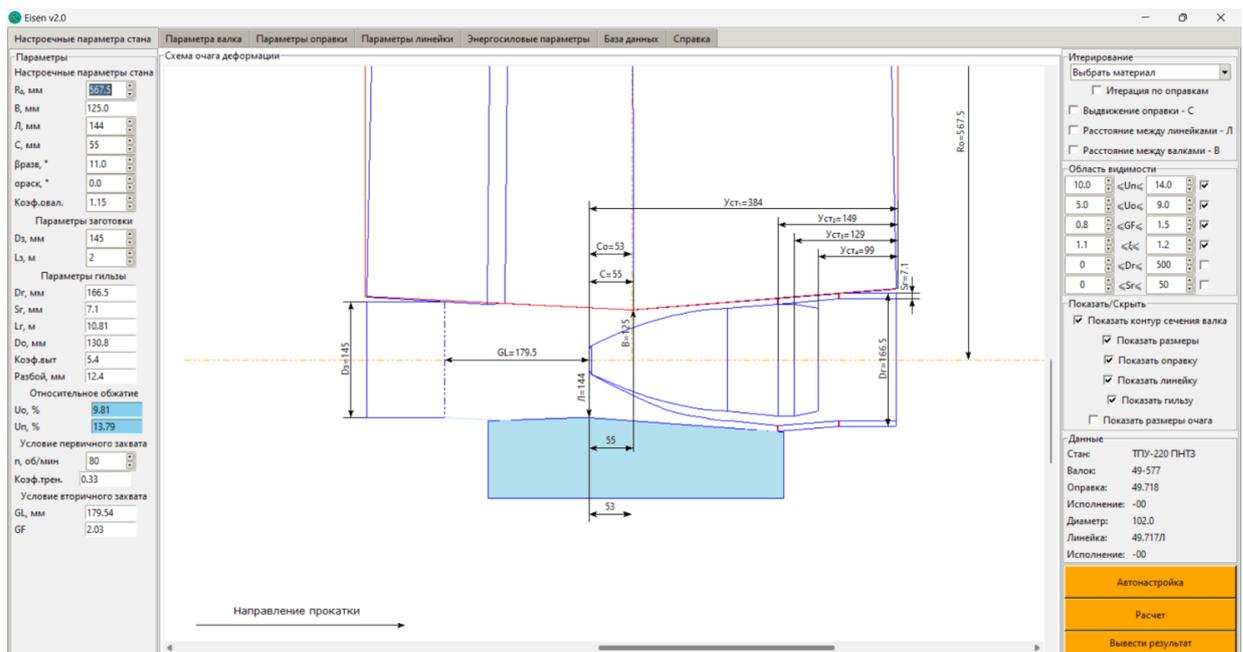


Рисунок 2.20 – Результаты расчёта в среде «Eisen v2.0» трубы с профилем $\text{Ø}159 \times 4,5$

Геометрические параметры гильзы, полученные по результатам моделирования в программных средах «QForm» и «Eisen v2.0», представлены в таблице 2.9 [47].

Таблица 2.9 – Полученные результаты по итогам расчетов

Наименование	Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм
«QForm»	166,5	7,16
Eisen v2.0	168,0	7,10
Отклонение, %	0,9	0,89

Отклонения по диаметру и толщине стенки гильзы, полученные в процессе моделирования, составили 0,9% и 0,89% соответственно. Эти результаты демонстрируют высокую точность расчетов, проведенных с использованием программного обеспечения «Eisen v2.0» по сравнению с данными моделирования в среде «QForm» [47].

2.4 Выводы по главе

1. Разработан алгоритм расчёта геометрических параметров очага деформации процесса прошивки. Сравнительный анализ расчетных значений с фактическими замерами показал максимальное отклонение в 0,69%, что подтверждает адекватность и высокую точность результатов расчёта.

2. На основе предложенного алгоритма была разработана программа «Eisen v2.0», предназначенная для расчёта геометрических параметров очага деформации и настройки прошивного стана. Был проведён сравнительный анализ с номинальными значениями геометрических параметров гильзы. Результаты, полученные с использованием программы «Eisen v2.0», показали меньшие отклонения от фактических значений (максимальное отклонение 1,42%), по сравнению с результатами, полученными в программе «QForm» (максимальное отклонение 2,28%). Это подтверждает высокую точность и эффективность предложенной программы для расчёта и оптимизации технологических параметров прокатки.

Глава 3. Исследование процесса прошивки после реконструкции прошивного стана ТПА 220 с целью повышения качества, точности и расширения сортамента труб

С целью улучшения качества продукции и снижения образования внутренних плен на трубах, а также для сокращения простоев оборудования, связанных с дополнительными перевалками прошивного стана, была проведена реконструкция прошивного стана ТПА 220. Одной из основных мер реконструкции стало удлинение бочки валка, что способствовало улучшению качества труб и расширению сортамента продукции, выпускаемой на данном агрегате. Реконструкция также позволила повысить производительность и обеспечить более стабильные технологические параметры процесса прокатки.

3.1 Освоение нового сортамента труб диаметром $\text{Ø}245$ мм в условиях ТПА 220

На начальном этапе освоения производства труб диаметром $\text{Ø}245$ мм на ТПА 220 требовалось обеспечить получение гильз диаметром 255 мм. Максимальный диаметр заготовки, применяемый на ТПА 220, составляет 230 мм, данный размер и был выбран для освоения. Обжатие в пережиме валков выбрано равным 13% исходя из максимального значения тонкостенности получаемых гильз $D_T/S_T=19,6$, при меньших значениях снижается запас тянущих сил трения и уменьшается коэффициент осевой скорости прошивки, повышается скольжение металла, а, следовательно, и цикличность процесса.

При обжатии заготовки диаметром 230 мм в пережиме на 13% для получения гильзы заданного диаметра 255 мм длина выходного участка при угле подачи $\beta = 11^\circ$ и $\alpha_{\text{вых}} = 3,9^\circ$ (рис.4.1) должна быть 403 мм. Так как рабочая длина выходного конуса составляет 315 мм, то очевидно, что получение гильзы диаметром 255 мм на действующей калибровке валков из заготовки диаметром 230 мм невозможно.

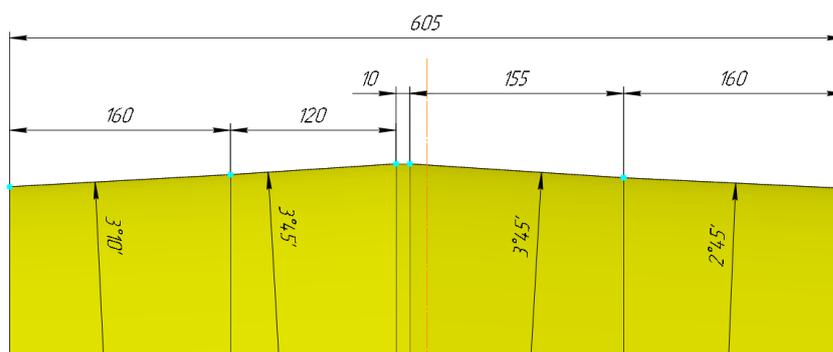


Рисунок 3.1 – Калибровка валка прошивного стана ТПА 220 в текущей технологии

В результате, в качестве опытного варианта была разработана калибровка, которая при угле подачи в 11° имеет длину выходного участка 380 мм и $\alpha_{\text{вых}} = 4,2^\circ$. Увеличение длины выходного участка было выполнено за счёт смещения пережима в сторону выхода на 64 мм и изменения калибровки входного участка. Входной участок был выполнен 2-х конусным – первый конус имеет длину в сечении по оси прокатки 127 мм, второй – 72 мм, углы конусности соответственно – $4,4^\circ$ и $6,1^\circ$.

По мнению В. В. Швейкина и Л. Н. Карпенко [45] ступенчатая калибровка позволяет улучшить условия захвата и уменьшить длину очага деформации в конусе прошивки. В своих трудах Ю. М. Матвеев и Я. Л. Ваткин [2] делают вывод о целесообразности ступенчатой калибровки при прошивке заготовок, мало отличающихся по диаметру, так как при широком сортаменте заготовок, прошиваемых на стане, часть заготовок при захвате может попасть в зону действия участка вала с повышенной конусностью, при которой нормальный захват нарушается.

Следовательно, применение спец. калибровки для производства труб остального сортамента (особенно из заготовки меньшего диаметра) является нецелесообразным.

Кроме того, помимо минимального обжатия перед носком оправки, для осуществления вторичного захвата необходимо, чтобы заготовка до оправки сделала как минимум один оборот, т. е. расстояние от сечения первичного захвата заготовки валками до носка оправки при угле подачи 11° [45] должно быть не менее 140 мм для заготовки диаметром 230 мм (по результатам расчётов в программе «Eisen v2.0») и 130 мм для заготовки диаметром 220 мм.

Выполнение данного условия обеспечивается при выдвигении носка оправки за пережим и соответствующего обжатия заготовки перед носком оправки:

- для заготовки диаметром 230 мм – 28 мм/ 10,4%.
- для заготовки диаметром 220 мм – 27 мм/ 10,6%.

Очевидно, что данные величины обжатий превышают максимально допустимые для получения качественной внутренней поверхности гильзы, особенно при использовании непрерывнолитых заготовок (далее по тексту – НЛЗ) в качестве заготовки (критическое обжатие НЛЗ не превышает 5%).

Таким образом, для обеспечения условий вторичного захвата заготовки диаметром 220÷230 мм при углах подачи 11° , требуется новая калибровка с целью снижения обжатия перед носком оправки.

С целью обеспечения величины обжатия перед носком оправки равным 8,5% (при угле подачи 11°) принимаем угол входного участка в сечении по оси прокатки равным 4° . Угол конусности выходного участка принимаем равным $4^\circ 20'$, что позволяет использовать оправки всех действующих калибровок.

Габариты входного участка определяются необходимостью обжатия заготовки диаметром 230 мм на 13% в пережиме (до 200 мм) при производстве труб 245 мм, т. е. длина входного участка в сечении по оси прокатки должна быть не менее 214 мм. Длина выходного участка определяется необходимостью получения гильз диаметром 255 мм из НЛЗ диаметром 220 мм, при обжатии 13% в пережиме валков длина выходного участка в сечении по оси прокатки должна быть не менее 413 мм. Пересчитаем длины входного и выходного участков в сечении «по шаблону» 210 и 405 соответственно.

Длина пережима принимается минимальной для измерения диаметра валкам – 5 мм, радиусы скругления с входной и выходной стороны бочки валка соответственно – 20 и 10 мм.

Таким образом, суммарная длина бочки валка должна быть равна 650 мм.

Существующая длина бочки валка составляет 605 мм. По результатам предварительной проработки – увеличение длины бочки валка до 650 мм возможно, для этого требуется доработать траверсу рабочего валка, с крышками увеличив расстояние между подшипниковыми опорами траверсы валка.

Основной целью реконструкции прошивного стана является:

- обеспечение снижения образования внутренних плён для всех сорментов выпускаемой продукции;
- обеспечение стабильности прокатки и качества труб Ø245 мм при использовании НЛЗ Ø220 мм;
- сокращения времени простоев на дополнительные перевалки прошивного стана;
- исключение необходимости дополнительных перевалок прошивного стана (длительностью около 3 ч) при переходе на прокатку труб Ø245 мм и обратно;
- обеспечение стабильности прокатки и качества труб Ø245 мм в части минимизации количества циклов деформации перед носком оправки, снижения влияния изменения установки стержня с оправкой на величину обжатия перед носком оправки, обеспечение стабильности захвата для заготовки диаметром Ø220.

Экономический эффект от выполнения работы заключается в сокращении времени простоя ТПА 220, обусловленного дополнительными перевалками прошивного стана. Исходя из утверждённых данных о потерях производства по цехам и агрегатам за один час простоя на 2018 год потери производства в денежном отношении за 1 час простоя ТПА 220 составят 119,5 тыс. руб. Соответственно, расчетный экономический эффект по результатам выполнения данной работы составит 4,3млн. руб./г.

3.2 Реконструкция валкового узлов прошивного стана ТПА 220

При реконструкции прошивного стана изменены конструкции следующих деталей: траверса, левая и правая крышка, барабан и бочка валка прошивного стана ТПА 220.

Длина бочки после реконструкции составляет 650 мм, что на 45 мм больше штатной длина бочки, следовательно, увеличивается центральный проем траверсы для установки бочки прошивного стана с 632 до 662 мм (рис. 3.2).

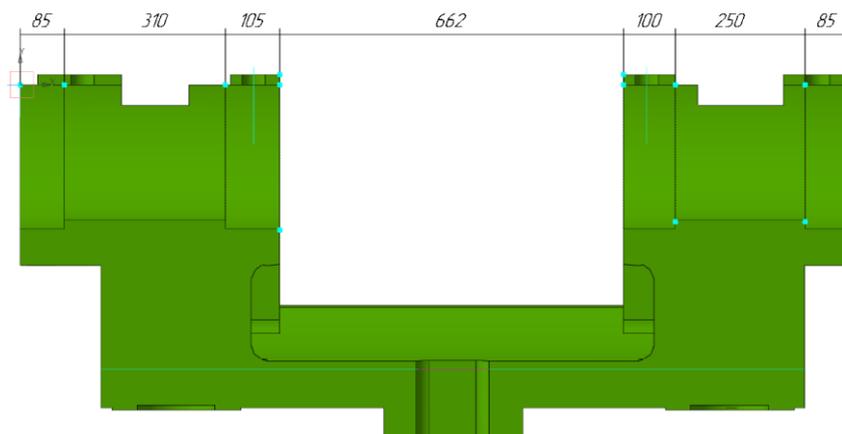


Рисунок 3.2 – Траверса прошивного стана ТПА 220 после реконструкции. 3Д модель траверсы в сечении

Так как центральный проем траверсы увеличивается, необходимо изменить габариты левой и правой крышек подушки валка (рис. 3.3 и 3.4).

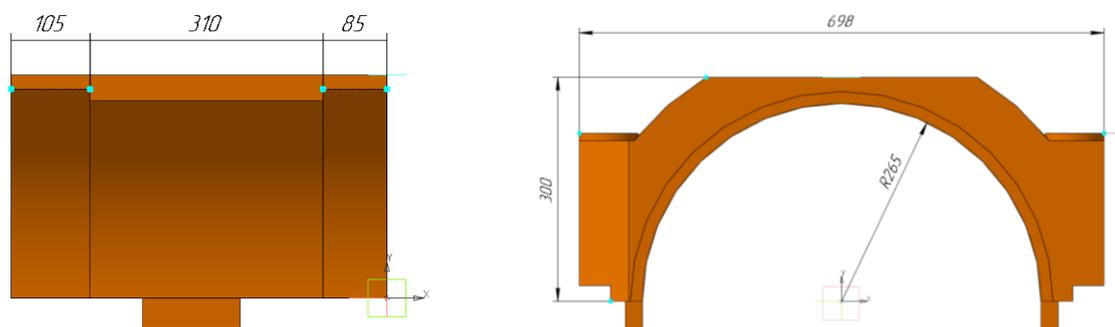


Рисунок 3.3 – Левая крышка прошивного стана ТПА 220 после реконструкции. 3Д модель в сечении

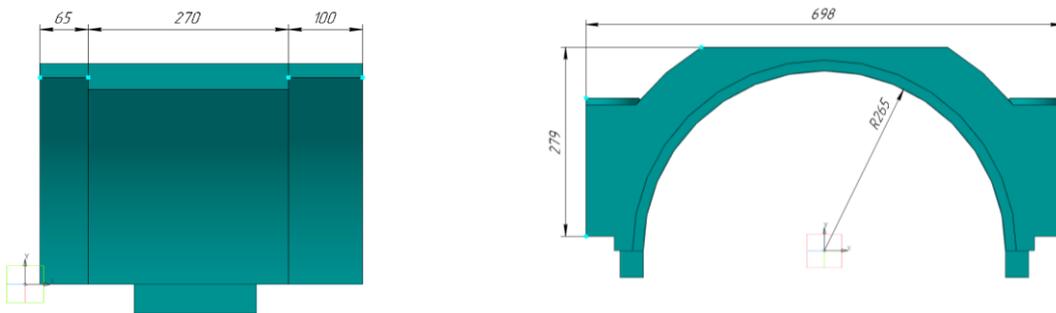


Рисунок 3.4 – Правая крышка прошивного стана ТПА 220 после реконструкции. 3D модель в сечении

Так как длина бочки увеличивается, необходимо увеличить ширину проемов в барабане до 675 мм (рис. 3.5).

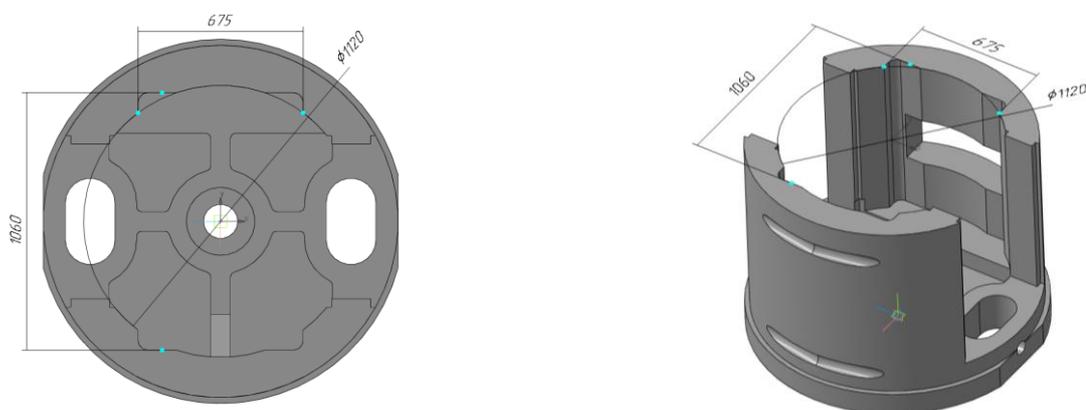


Рисунок 3.5 – Барабан прошивного стана ТПА 220 после реконструкции. 3D модель вид сверху

Ширина бочки валка прошивного стана увеличена с 605 до 650 мм (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Бочка прошивного стана ТПА 220 после реконструкции. 3D модель

3D модели валка в сборе приведены на рисунках 3.7. Расстояние между торцом бочки прошивного стана и краем барабана составило 11,5 мм и между траверсой и торцом бочки прошивного стана 6 мм, что вполне достаточно для прошивки заготовки.

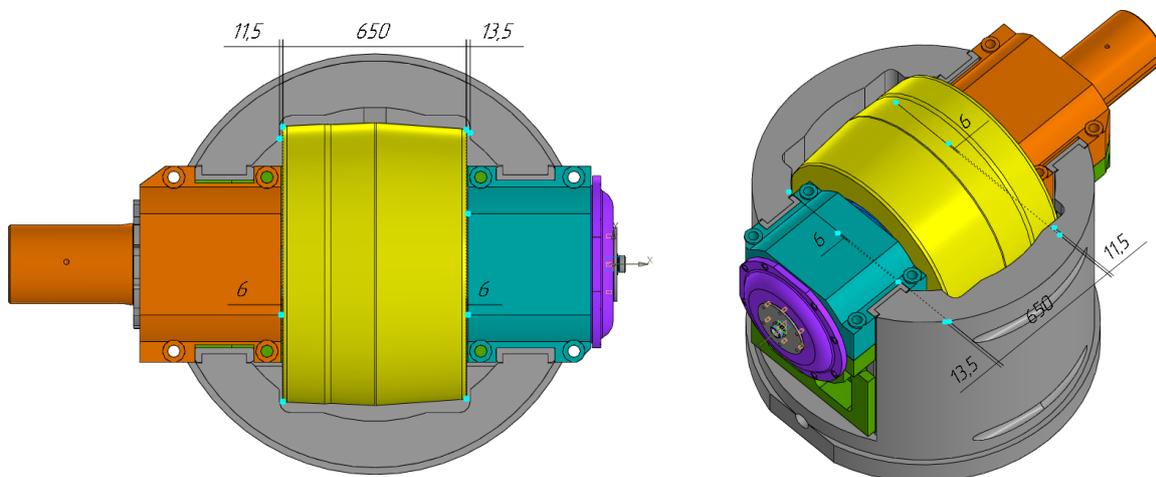


Рисунок 3.7 – Барабан с рабочим валком после реконструкции. 3D модель вид сверху

3.3 Калибровка инструментов прошивного стана ТПА 220

Расчёт калибровки инструментов выполняли с помощью компьютерной программы «Eisen v2.0», что сильно упростило задачу и сократило время на разработку. Для изготовления оправки применили сталь марки 30ХН3А по ГОСТ 4543–71 [48]. Данная марка стали обеспечивает довольно высокую жаропрочность. Новая калибровка оправки для удлиненной бочки прошивного стана отличается от штатной калибровки геометрическими размерами (рис. 3.8).

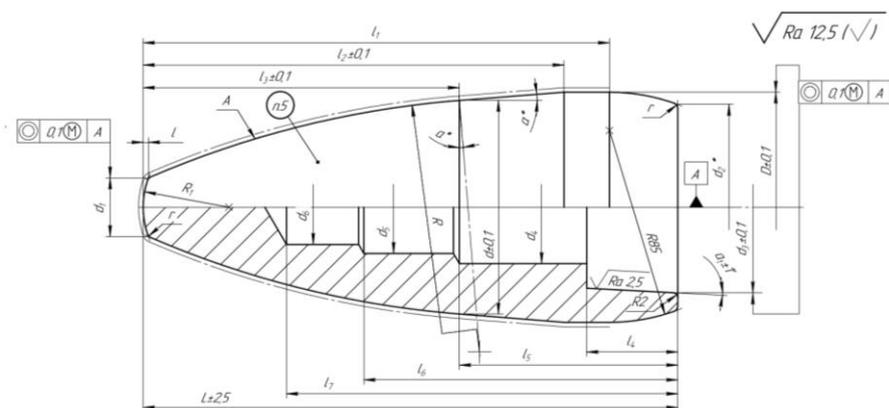


Рисунок 3.8 – Новая калибровка оправки для удлиненной бочки валка

Новая калибровка направляющей линейки имеет более глубокий желоб по сравнению со штатной калибровкой линейки прошивного стана ТПА 220 с целью обеспечения равномерного износа рабочей части направляющей линейки и повышения износостойкости линеек. (рис. 3.9).

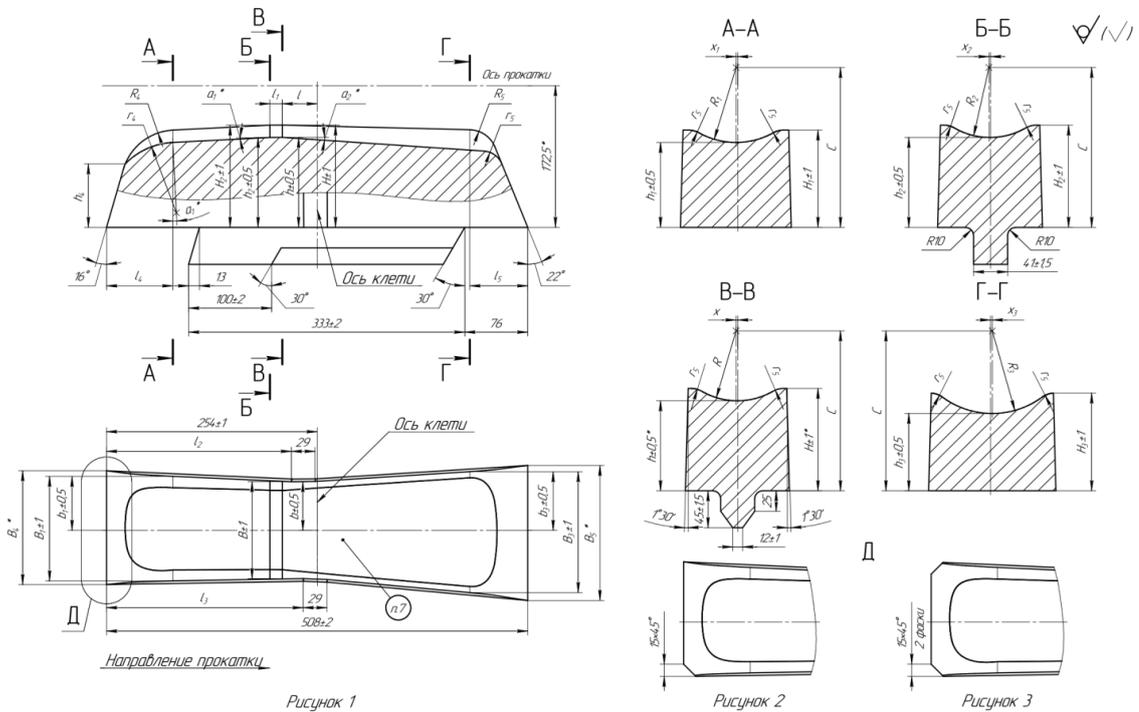


Рисунок 3.9 – Новая калибровка линейки для удлиненной бочки ТПА 220

Бочка прошивного стан ТПА 220 является бочковидной с тремя участками входного конуса. Данную калибровку представила Масютина О.Н. [46] в своём патенте. Достоинством калибровки бочки прошивного стана с «зоной отдыха» является уменьшенное частое обжатие, что позволяет уменьшать склонность к разрушению в центральной части заготовки перед носком оправки, тем самым уменьшив вероятность образования плены на внутренней поверхности гильзы. Новая калибровка прошивного стана ТПА 220 показана на рисунке 3.10.

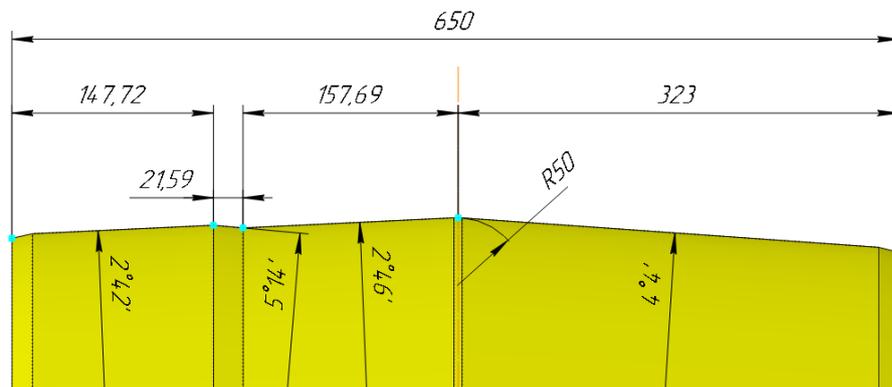


Рисунок 3.10 – Бочка валка прошивного стана ТПА 220 после реконструкции. 3D модель

На первом участке, образованном конусом 4 (рис. 3.11), происходит захват слитка-заготовки и его обжатие по диаметру. Наличие насечки на этом участке обеспечивает лучший захват и удержание слитка-заготовки в очаге деформации. Условно его можно разделить на пять зон. В первой зоне I происходит первичный захват и обжатие металла по диаметру. Процесс прошивки необходимо вести таким образом, чтобы не было достигнуто критическое обжатие, поэтому на бочке валка после гребня 5 выполняют пережим (зона II). В зоне II обжатие не производится, так как она имеет отрицательную конусность. Зона II осуществляет переход от одного конусного участка к другому с целью перераспределения деформации, в результате чего напряжение снижается и не достигает своего критического значения [46].

В третьей зоне III на пути течения металла встречается гребень 5 с положительной конусностью, который создает дополнительное сопротивление течению металла. Это приводит к смене схемы напряженного состояния металла в очаге деформации. Гребень 5 отвечает за вторичный захват и за прошивку слитка-заготовки в полу ю гильзу. На этом участке также выполнена насечка, которая улучшает вторичный захват слитка-заготовки [46].

В четвертой зоне IV, так же как и во второй, обжатие не производится [46].

В пятой зоне V течение металла обеспечивается коническим участком 1, который отвечает за формирование толщины стенки и диаметра получаемой гильзы [46].

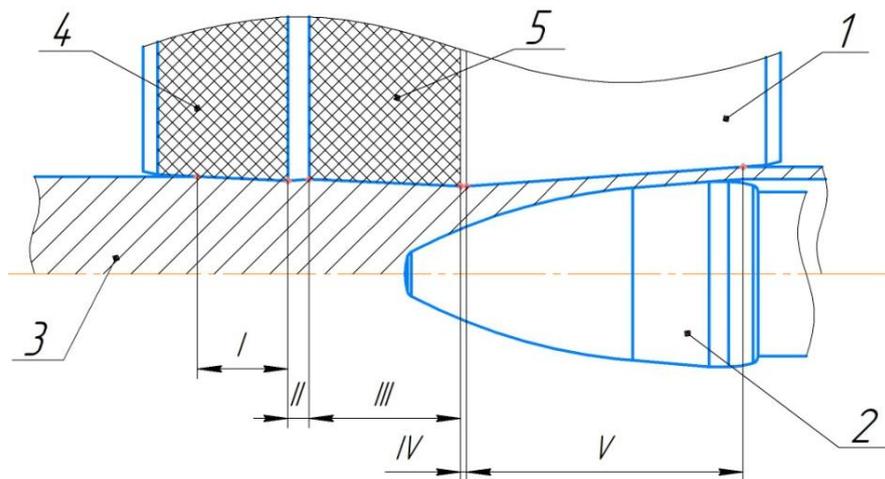


Рисунок 3.11 – Бочка прошивного стана ТПА 220 после реконструкции. 3Д модель

3.4 Экспериментальная прокатка на стане ТПА 220

3.4.1 Подготовка к экспериментальной прокатке

После сборки инструментов прошивного стана было проверено фактическое расположение валков прошивного стана (рис. 3.12 и 3.13). На рисунке можно увидеть, что зазор

между торцом рабочего валка прошивного стана и подушками достаточен для вращения рабочего валка.



Рисунок 3.12 –Валки прошивного стана ТПА 220 в сборе



а)



б)

а) Входная часть прошивного стана; б) выходная часть прошивного стана

Рисунок 3.13 – Зазор между торцом рабочего валка и подушками

Отливку линеек (рис. 3.14) производили с применением технологии ХТС. Технология литья с применением ХТС позволяет получать более точные по геометрическим параметрам отливки. Точность отливки принята по ГОСТ 26645 [49].



Рисунок 3.14 – Направляющие линейки, изготовленные по технологии литья с применением ХТС

3.4.2 Результаты экспериментальной прокатки

Настроечные параметры прошивного стана рассчитывались, используя разработанный программный комплекс «Eisen v2.0».

По итогам экспериментальной прокатки было прокатано около 500 тонн горячекатаных бесшовных труб и достигнуты качественные показатели 91,88% годной продукции (рис. 3.15), что на 12,9% выше объема годной продукции при производстве труб типоразмера $\text{Ø}159 \times 4,5 \div 6,5$ в штатном режиме (рис. 3.16). Образование внутренних плен сократилось на 20,27% от всего объема произведенных труб. Результаты экспериментальной прокатки в виде графика приведены на рисунке 3.15.

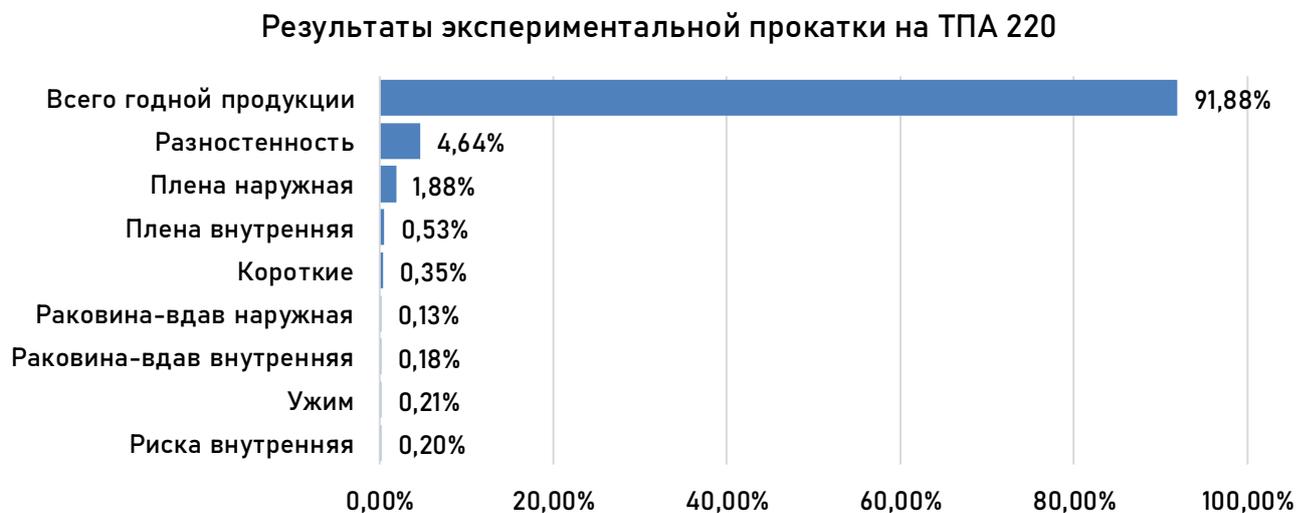


Рисунок 3.15 – Статистика по результатам опытной прокатки

Результаты производства в штатном режиме работы ТПА 220

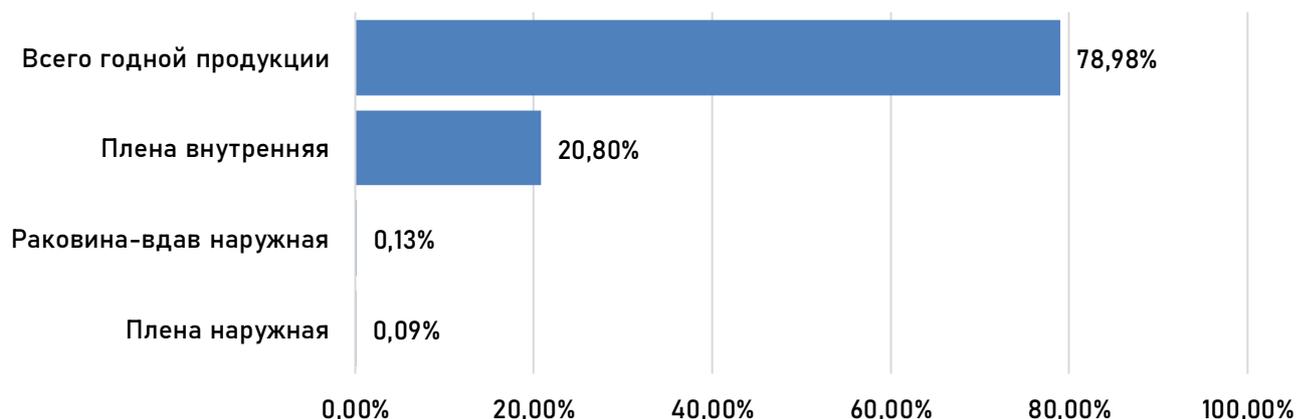


Рисунок 3.16 – Статистика производства в штатном режиме работы

В ходе испытаний зафиксирована износостойкость оправки 701 проходов, что является рекордным показателем в условиях ТПА 220. В 702-м проходе оправка была заменена, в связи с разрушением носовой части оправки (рис. 3.17).



а) вид сбоку; б) вид сверху

Рисунок 3.17 – Оправка Ø140 прошивного стана после 701 проходов

По результатам опытной прокатки зафиксирована максимальная стойкость направляющей линейки 1025 проходов (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Направляющая линейка прошивного стана ТПА 220 после 1025 проходов

3.5 Сравнение полученных результатов опытной прокатки и расчётов в компьютерной программе «Eisen v2.0»

В ходе экспериментальной прокатки на прошивном стане ТПА 220 стан был остановлен для взятия заторможенной заготовки при прокатке размера труб $\text{Ø}159 \times 4,5$ (рис. 3.19) с целью проведения сравнительного анализа с ранее рассчитанными значениями в среде «Eisenv2.0».

Сравнительный анализ был проведен также для ранее подготовленной «торможенной заготовки» для трубы $\text{Ø}219 \times 14$, который был отобран в ходе прокатки по штатной калибровке в условиях ТПА 220 [47].



Рисунок 3.19 – «Торможенная заготовка» трубы размером $\text{Ø}159 \times 4,5$ мм

Настроечные параметры прошивного стана при проведении опытной прокатки приведены в таблице 3.1 [47].

Таблица 3.1 – Настроечные параметры прошивного стана ТПА 220

Диаметр заготовки, мм	Выдвижение оправки за пережим, мм	Расстояние между валками, мм	Расстояние между линейками, мм	Коэффициент овализации	Угол поворота валков, град
145	55	127,70	144	1,12	11,00

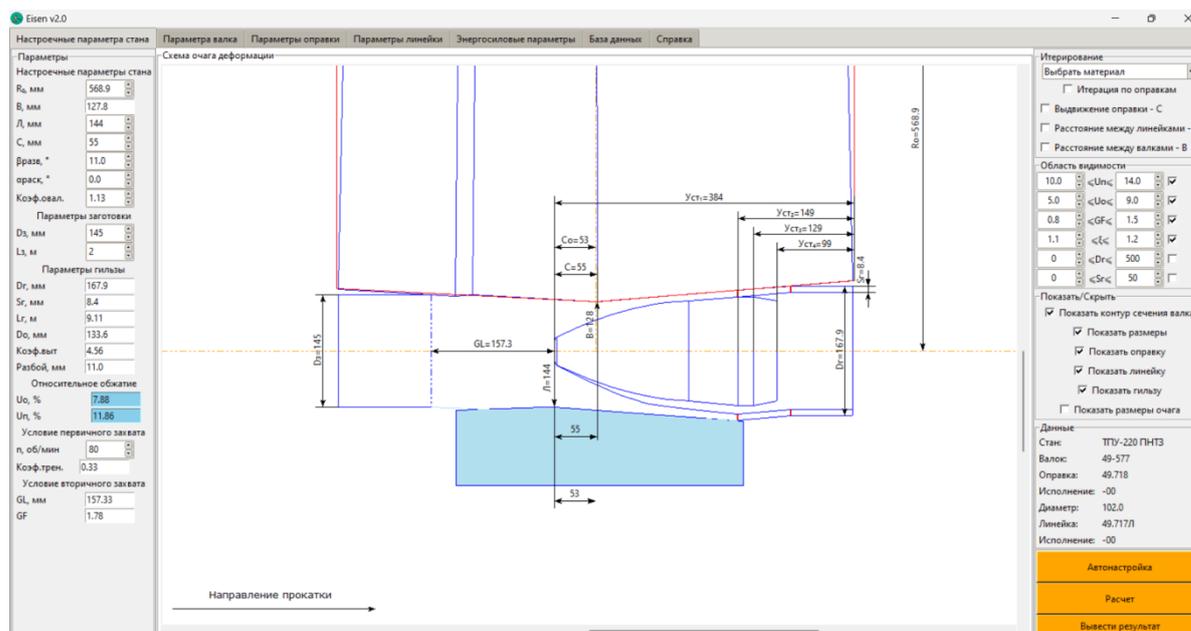


Рисунок 3.20 – Результаты расчёта параметров прокатки на стане ТПА 220 для трубы $\varnothing 159 \times 4,5$ в компьютерной программе «Eisen v2.0»

Таблица 3.2 – Результаты опытной прокатки по торможённой заготовке

Результаты	Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм	Обжатие перед носком оправки, %	Обжатие в пережиме, %	Расстояние GL, мм	Коэффициент GF	Диаметр заготовки перед носком, мм
Заторможённая заготовка	166,8	8,5	8,00	11,80	160,00	1,80	133,2
«Eisen v2.0»	167,9	8,4	7,88	11,86	157,33	1,78	133,6
Отклонение, %	0,65	1,17	1,5	0,50	1,68	1,11	0,3

Замеры «заторможённой» заготовки и результаты расчетов в разработанной программе показали отклонения по диаметру гильзы 0,65% и по толщине стенки 1,17% (рис. 3.20 и таблица 3.2).

3.6 Выводы по главе

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Реконструкция стана позволила увеличить выход годной продукции на 12,9%, брак по внутренним пленам снизился на 16,16%;
2. Результаты замеров «заторможённой» заготовки позволили подтвердить адекватность расчёта по разработанной программе. Отклонение по диаметру составило 0,65% и толщине стенки 1,17%, что подтверждает высокую точность разработанной программы «Eisenv2.0»;

3. Реконструкция прошивного стана и разработка калибровок с помощью программы «Eisenv2.0» позволило увеличить износостойкость оправок до 701 проходов (стойкость оправок в текущей технологии 604 проходов) и линеек до 1025 проходов (стойкость линеек в текущей технологии 940 проходов).

Глава 4. Исследование образования дефектов на концевых участках тонкостенных гильз при прокатке на ТПА с автоматическим станом

В данной главе исследован технологический процесс прокатки труб на ТПА с автоматическим станом и выявлены причины образования дефектов в виде концевых складок. Предложено решение для минимизации образования концевых складок на задних концах черновых труб при прокатке на ТПА с автоматическим станом. Результаты исследования показали, что концевые складки на задних концах черновых труб образуются в результате повышенного относительного обжатия по стенке черновой трубы при прокатке в первом проходе на автоматическом стане, что приводит к сплющиванию заднего конца черновой трубы и образованию продольных складок. В работе представлены результаты моделирования процесса раскатки на автоматическом стане в среде «QForm». Предложено оптимальное решение для предотвращения образования концевых складок на концах черновых труб [25].

4.1 Методика проведения исследований

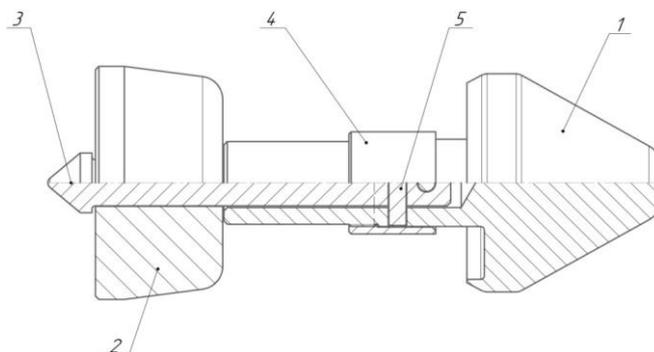
С целью анализа раскатки гильз с дополнительной втулкой на автоматическом стане ТПА 220 было проведено моделирование процесса раскатки в среде «QForm». Моделирование процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220 было выполнено для труб различных размеров, включая $\varnothing 127 \times 4,5$; $\varnothing 133 \times 4,0$; $\varnothing 133 \times 5,0$; $\varnothing 140 \times 5,0$; $\varnothing 152 \times 5,0$; $\varnothing 159 \times 4,5$; $\varnothing 159 \times 5,0$; $\varnothing 168 \times 5,0$; $\varnothing 180 \times 6,0$; $\varnothing 194 \times 6,0$; $\varnothing 219 \times 7,0$; $\varnothing 219 \times 8,0$; $\varnothing 245 \times 8,0$. Для каждого из этих размеров труб были проведены три варианта моделирования: раскатка без дополнительной втулки, раскатка с дополнительной втулкой с расстоянием 20 мм между оправкой и втулкой, а также раскатка с дополнительной втулкой с расстоянием 30 мм между оправкой и втулкой. Разница между диаметрами оправки и втулки варьировалась от 2 до 4 мм.

Втулки устанавливались в обоих проходах процесса раскатки, так как существует вероятность образования концевых складок и в первом проходе при раскатке на автоматическом стане. Рисунок 4.1 иллюстрирует действующую сборку оправочного узла на автоматическом стане ТПА 220 [25].

Полученные результаты моделирования оценивались визуально. Основным индикатором наличия концевых складок в среде «QForm» является появление красных точек, которые обозначают места образования дефектов.

На рисунке 4.3 представлена 3D модель черновой трубы после второго прохода на автоматическом стане, выполненная без установки дополнительной втулки. Красные точки на

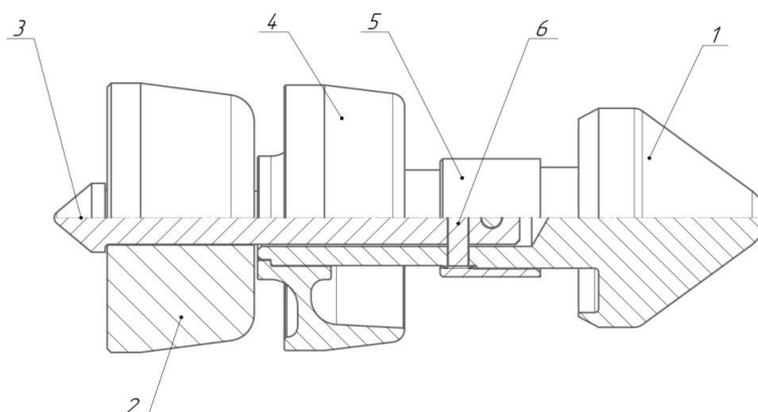
модели указывают на наличие складок на конце черновой трубы, что служит подтверждением образования дефектов в процессе раскатки [25].



1 – головка; 2 – оправка; 3 – шпилька; 4 – гайка; 5 – штифт

Рисунок 4.1 – Действующая конструкция оправочного узла

На рисунке 4.2 представлена предлагаемая конструкция оправочного узла.



1 – головка; 2 – оправка; 3 – шпилька; 4 – втулка; 5 – гайка; 6 – штифт

Рисунок 4.2 – Предлагаемая конструкция оправочного узла [50]



а)

б)

а) вид сверху; б) вид фронтальный

Рисунок 4.3 – 3D модель черновой трубы после второго прохода раскатки на автоматическом стане без установки дополнительной втулки

4.2 Моделирование в среде «QForm»

Для анализа процесса прокатки черновой трубы на автоматическом стане ТПА 220 было проведено моделирование в среде «QForm». В ходе моделирования варьировалось расстояние между оправкой и втулкой, что позволило получить модель черновой трубы для визуальной оценки [25].

Складки на полученных моделях черновой трубы были отображены в виде красных точек, что служит индикатором дефектов, возникших в процессе раскатки.

Типоразмеры труб и штатная таблица прокатки на автоматическом стане ТПА 220 представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Типоразмеры тонкостенных труб и параметры автоматического стана ТПА 220

№	Размер трубы	Высота калибра, мм		Диаметр оправки, мм		Размер гильзы, мм	Коэффициент вытяжки		Суммарная вытяжка	Относительное обжатие по стенке, %			D/S			
		Номинальная	Фактическая	1-пр	2-пр		1-пр	2-пр		1-пр	2-пр	Сум				
														D × S	H _к ^н	H _к ^ф
		1	127×4,5	127,0	128		117	119		137,0×9,0	1,57	1,24		2,09	38,9	18,2
2	133×4,0	132,0	133	123	125	143,1×8,6	1,68	1,26	2,24	41,8	20,0	53,5	33,2			
3	133×5,0	132,0	133	119	121	139,0×10,0	1,32	1,42	2,02	30,0	28,6	50,0	26,6			
4	140×5,0	139,0	140	127	129	147,0×9,5	1,37	1,31	1,94	31,6	23,1	47,3	28,0			
5	152×5,0	152,0	153	140	142	162,0×9,5	1,40	1,32	1,97	31,6	13,1	47,3	30,4			
6	159×4,5	157,0	158	147	149	168,6×9,4	1,66	1,22	2,15	41,5	18,2	51,9	35,3			
7	159×5,0	157,0	158	146	148	168,7×9,9	1,60	1,20	2,04	39,4	16,7	49,5	31,8			
8	168×5,0	167,0	168	156	158	178,6×10,0	1,61	1,21	2,07	40,0	16,7	50,0	33,6			
9	180×6,0	181,0	182	166	168	191,0×11,0	1,30	1,36	1,90	27,2	25,0	45,5	30,0			
10	194×6,0	193,0	194	179	181	204,0×11,0	1,40	1,26	1,88	31,8	20,0	45,5	32,3			
11	219×7,0	216,0	217	201	203	229,1×12,5	1,50	1,14	1,82	36,0	12,5	44,0	31,3			
12	219×8,0	216,0	217	199	201	229,3×13,6	1,44	1,12	1,74	33,8	11,1	41,2	27,4			
13	245×8,0	242,4	244	226	228	256,7×13,8	1,47	1,13	1,77	34,8	11,1	42,0	30,6			

4.3 Анализ результатов моделирования

В результате моделирования в среде «QForm» были получены 3D модели черновых труб после процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220. Моделирование позволило визуально оценить дефектные зоны и выявить причины их возникновения.

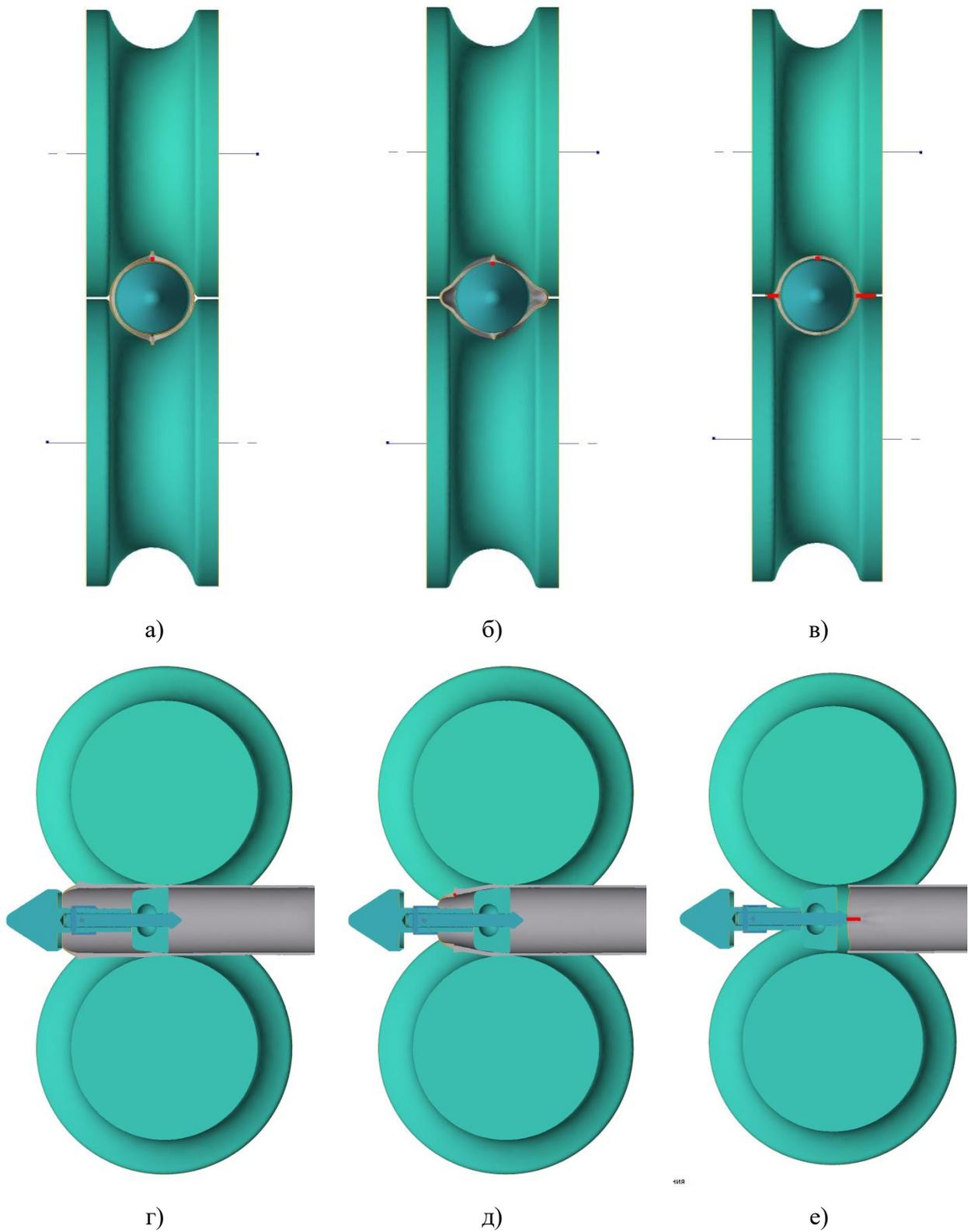
По результатам моделирования было установлено, что дефектообразование происходит вследствие сплющивания заднего конца черновой трубы во втором проходе в процессе раскатки. При раскатке без дополнительной втулки задний конец черновой трубы подвергается сплющиванию и затекает между ребордами валков автоматического стана, что приводит к образованию дефектов (рис. 4.4) [25].

При раскатке с дополнительной втулкой был получен иной результат. Установка дополнительной втулки на спутнике с оправкой эффективно препятствует сплющиванию заднего конца черновой трубы. Это решение значительно снижает образование продольных складок, что подтверждается моделированием в среде «QForm» (рис. 4.5). Внедрение втулки позволяет улучшить качество продукции, минимизируя дефекты на задних концах труб и обеспечивая более стабильный процесс раскатки [25].

Результаты моделирования с различными расстояниями между оправкой и втулкой (0, 20, 30 и 40 мм) показали идентичные результаты в отношении формирования концевых складок, что указывает на их малую зависимость от этого параметра. Однако было выявлено, что еще одним фактором, влияющим на образование концевых складок, является относительное обжатие по стенке гильзы в первом проходе [25].

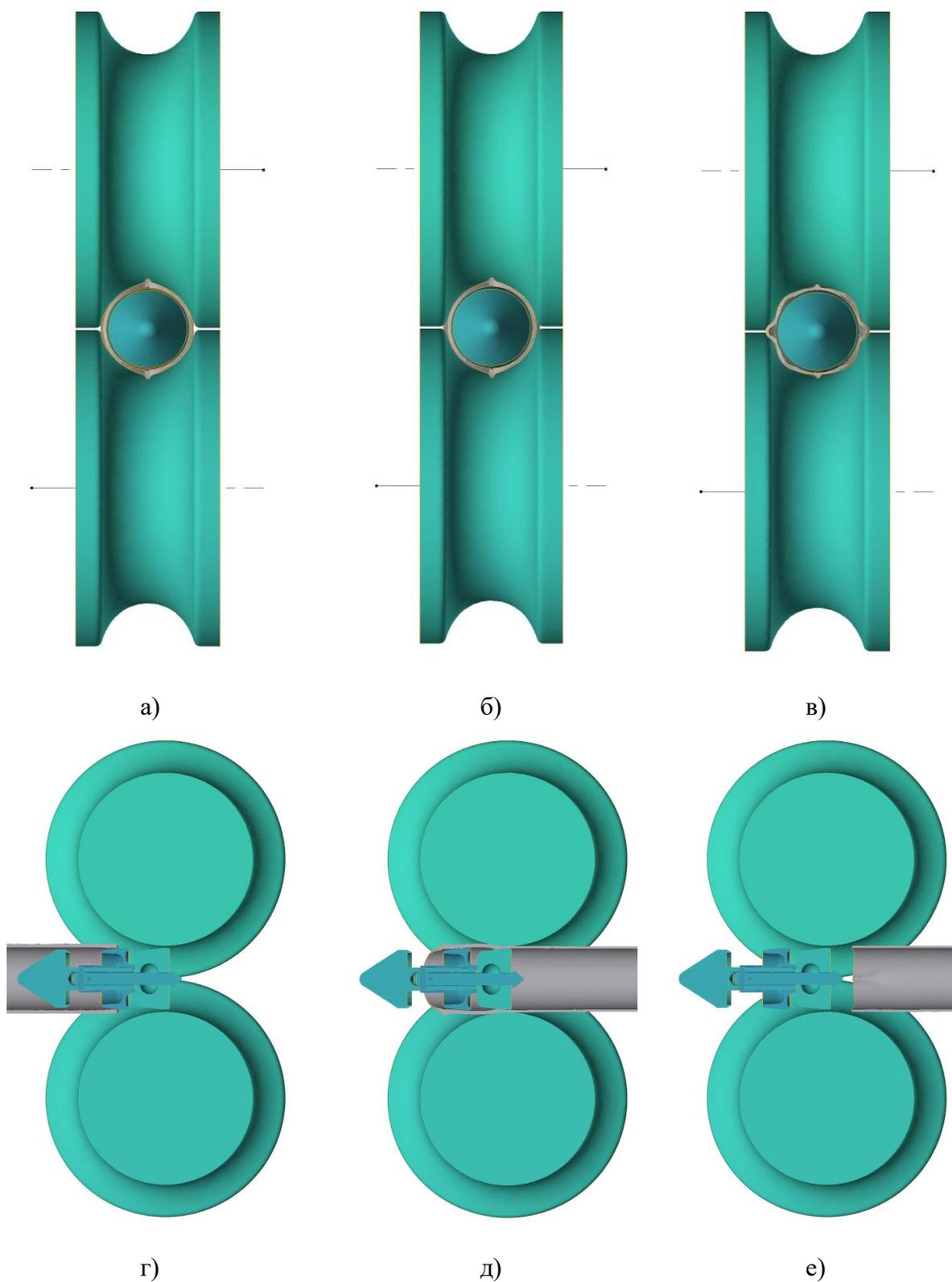
Для анализа этого влияния этого фактора был построен график зависимости относительного обжатия по стенке черновых труб в первом проходе от размера труб (рис. 4.6). На графике зелёная пунктирная линия отображает порог начала образования «плавников». При превышении значения относительного обжатия 30,0 % начинается образование концевых складок. Красная пунктирная линия показывает предел в 39,4 %, при котором установка дополнительной втулки уже не может предотвратить образование концевых продольных складок.

В результате анализа было установлено, что для труб с размерами $\text{Ø}133 \times 4,0$; $\text{Ø}159 \times 4,5$; $\text{Ø}159 \times 5,0$; $\text{Ø}168 \times 5,0$ установка втулок не предотвращает образование концевых складок, так как на этих размерах труб наблюдается повышенное относительное обжатие (более 39,4 %) по стенке в первом проходе. Для решения проблемы уменьшения объема концевых складок предложено уменьшение толщины стенки гильзы, что способствует снижению относительного обжатия на первом проходе и, как следствие, снижению образования дефектов [25].



а) начало процесса, вид фронтальный; б) середина процесса, вид фронтальный; в) конец процесса, вид фронтальный; г) начало процесс, вид сбоку в разрезе; д) середина процесса, вид сбоку в разрезе; е) конец процесса, вид сбоку в разрезе.

Рисунок 4.4 – Процесс образования дефектов в виде «плавников» при прокатке на автоматическом стане ТПА 220 без втулки в среде «QForm».



а) начало процесса, вид фронтальный; б) середина процесса, вид фронтальный; в) конец процесса, вид фронтальный; г) начало процесс, вид сбоку в разрезе; д) середина процесса, вид сбоку в разрезе; е) конец процесса, вид сбоку в разрезе.

Рисунок 4.5 – Процесс выхода концы труб из клетки при прокатке в автоматическом стане ТПА 220 с установкой втулки в среде «QForm»

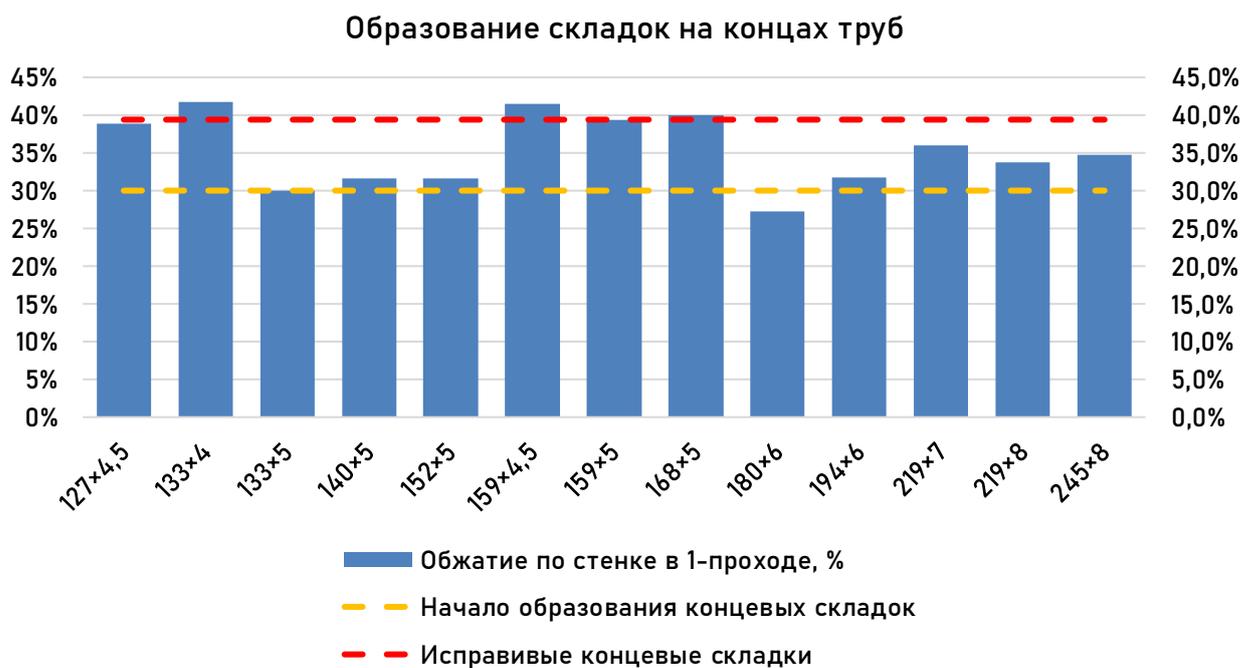


Рисунок 4.6 — График зависимости относительного обжатия по стенке в первом проходе от сортамента [25]

4.3.1 Моделирование процесса раскатки на автоматическом стане

Основной причиной образования концевых складок является повышенное обжатие по толщине стенки гильзы в первом проходе, которое возникает в процессе раскатки. Для минимизации этих дефектов предлагается провести моделирование процесса раскатки с пониженной толщиной стенки гильзы. Исследование проведено для трубы размером $\text{Ø}159 \times 4,5$ [25].

Согласно таблице прокатки, толщина гильзы для данного сорта трубы составляет $S = 9,36$ мм. В ходе опытной работы было предложено уменьшить толщину стенки гильзы до 8,5 мм, что позволяет уменьшить относительное обжатие в первом проходе. После проведения этих изменений обжатие по стенке в первом проходе составит 35,29%, что является оптимальным значением для предотвращения образования концевых складок. Это изменение должно способствовать снижению дефектов, улучшению качества труб и повышению производственной эффективности на автоматическом стане ТПА 220 [50].

4.3.1.1 Результаты моделирования процесса раскатки в «QForm» трубы $\text{Ø}159 \times 4,5$

Результаты моделирования процесса раскатки для трубы размерами $\text{Ø}159 \times 4,5$ представлены на рисунке 4.7. В процессе моделирования использованы оправки

диаметром $\varnothing 147$ мм для первого прохода и $\varnothing 149$ мм для второго. Также для моделирования была использована гильза размером $\varnothing 168,6 \times 8,5$. Моделирование было проведено как без установки дополнительной втулки, так и с установленной дополнительной втулкой (рис. 4.7). Длина втулки составила 30 мм.

Для анализа параметров раскатки на автоматическом стане ТПА 220 были определены расчётные параметры процесса, которые приведены в таблице 4.2. Моделирование позволило провести сравнение воздействия наличия втулки на процесс раскатки и выявить изменения в геометрических и силовых характеристиках прокатки трубы, а также оценить её влияние на образование дефектов, таких как концевые складки. Полученные результаты будут полезны для дальнейшего совершенствования технологии и оптимизации параметров прокатки на ТПА 220.

Таблица 4.2 – Расчётные параметры раскатки на автоматическом стане для трубы $\varnothing 159 \times 4,5$

Размеры трубы, мм $D \times S$	Диаметр оправки, мм		Диаметр втулки, мм		Длина втулки, мм	Размеры гильзы, мм $D_r \times S_r$	Обжатие по стенке, %	
	1-пр	2-пр	1-пр	2-пр			1-пр	2-пр
	159×4,5	147	149	145			147	60



Рисунок 4.7 – Внешний вид черной труб после моделирования раскатки на автоматическом стане ТПА 220

Моделирование показало, что относительное обжатие в первом проходе имеет значительное влияние на образование концевых складок. По результатам моделирования

было установлено, что после уменьшения толщины стенки гильзы величина «плавников» заметно сокращается. Это подтверждает гипотезу, что снижение толщины стенки гильзы снижает относительное обжатие и, как следствие, уменьшает вероятность возникновения дефектов в виде концевых складок. Таким образом, оптимизация толщины гильзы является эффективным методом для контроля и минимизации подобных дефектов в процессе раскатки на автоматическом стане ТПА 220 [25].

4.4 Моделирование статической нагрузки на втулку в среде «SolidWorks Simulation»

Проведено моделирование статической нагрузки на втулку в среде «SolidWorks Simulation», с целью оценки её прочности и работы при эксплуатации. Согласно результатам моделирования, максимальное усилие на втулку при работе на автоматическом стане ТПА 220 составляет 10 кН. Это значение усилия является критическим и применяется для дальнейших расчётов и разработки конструктивных решений для повышения надёжности втулки. Следовательно, при эксплуатации в реальных условиях на втулку будет приложено усилие порядка 10 кН, что необходимо учитывать при проектировании и выборе материалов для её изготовления, а также при расчёте износостойкости и долговечности данного компонента.

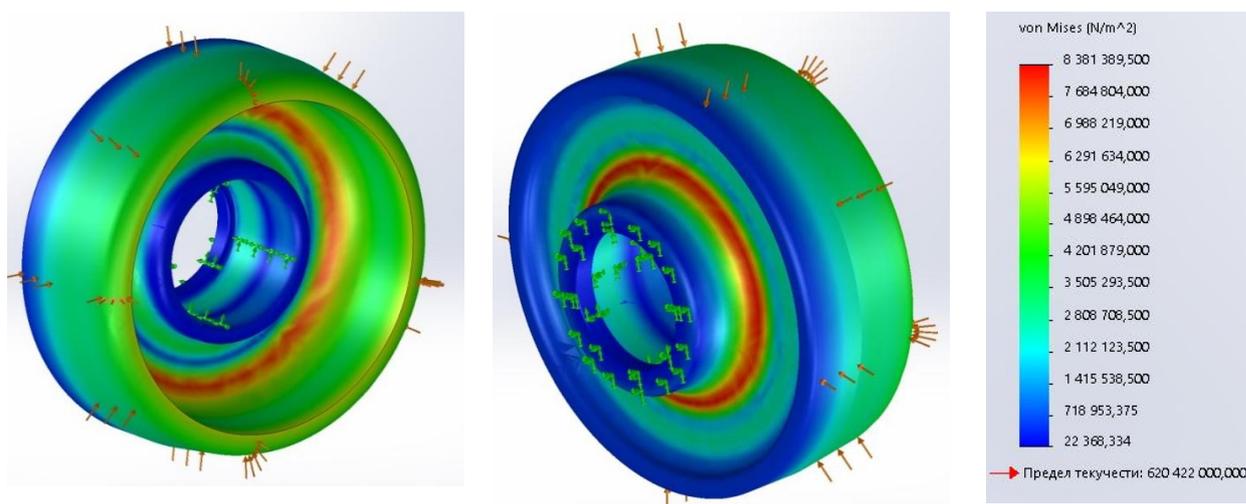


Рисунок 4.8 –Результаты моделирования статической нагрузки на втулки диаметром $\varnothing 192$ мм в среде «SolidWorks Simulation»

На рисунке 4.8 представлены результаты испытания прочности втулки в среде «SolidWorks Simulation». В ходе моделирования использовалась легированная сталь в

качестве материала для втулки. Напряжение, которое оказывается на втулку, не превышает допустимого значения предела текучести выбранного материала. Это подтверждает, что втулка будет функционировать в рамках заданных эксплуатационных условий без риска разрушения. Следовательно, вероятность разрушения детали при нормальной эксплуатации крайне низкая, что подтверждает эффективность выбранного материала и конструкции втулки для работы на трубопрокатном агрегате ТПА 220.

4.5 Экспериментальная прокатка на автоматическом стане ТПА 220

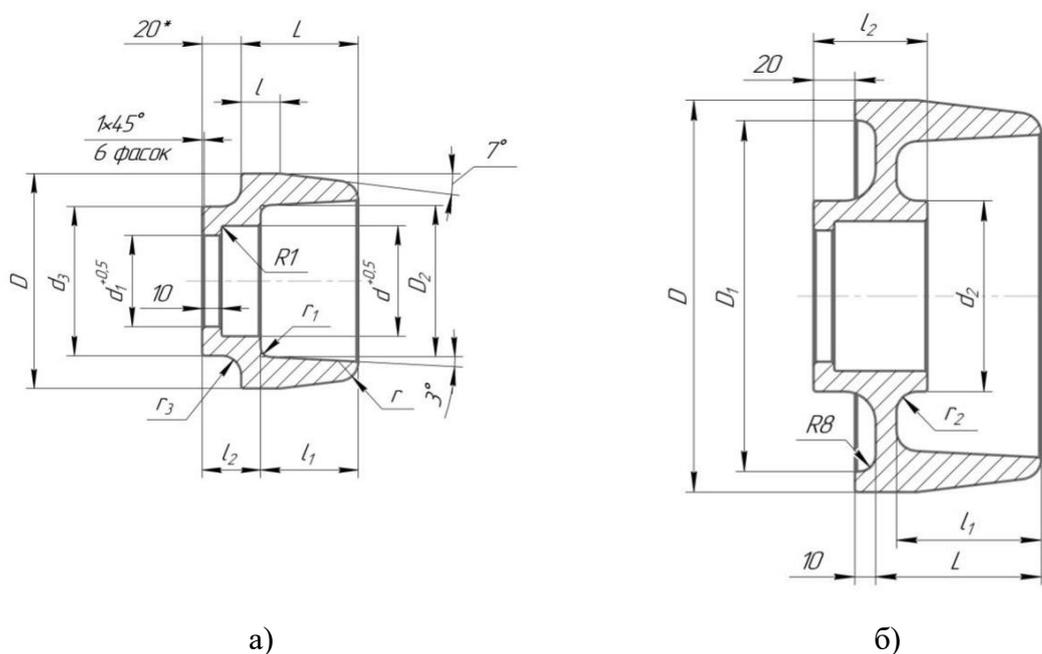
Опытная прокатка была проведена на автоматическом стане ТПА 220 с целью проверки предложенной методики и инструментов. Для успешного проведения экспериментальной прокатки было необходимо изготовить специализированные инструменты, включая головку и дополнительную втулку оправочного узла. Эти инструменты были разработаны с учетом особенностей процесса и направлены на улучшение качества прокатки, предотвращение образования дефектов, таких как концевые складки, а также повышение долговечности оборудования. Изготовление и установка этих инструментов позволили провести опытную прокатку с использованием новых технологических решений и обеспечить более точные результаты в процессе прокатки труб.

4.5.1 Изготовление инструментов

Втулки были изготовлены по специально разработанным чертежам, которые представлены на рисунке 4.9. Эти чертежи учитывают все технологические требования, необходимые для обеспечения корректной работы втулок в процессе раскатки труб на автоматическом стане ТПА 220. Изготовление втулок по данным чертежам обеспечило точность их соответствия размерным параметрам, а также позволило достичь необходимого уровня прочности и износостойкости в условиях работы на станах.

В качестве материала для изготовления втулок была использована сталь X12МФ, соответствующая ГОСТ 5950–73 [51]. Сталь X12МФ обладает высокой прочностью и износостойкостью, что является важным требованием для эксплуатации в условиях трубопрокатного оборудования. Термообработка материала включала закалку с последующим отпуском. Нагрев сталей производился в электросоляной ванне при температуре 1050 °С, что позволило достичь необходимой структуры материала для повышения его прочностных характеристик. После закалки втулки подвергались отпуску при температуре 650 °С, что обеспечивало улучшение их механических свойств, снижая

хрупкость и повышая стойкость к износу. Твердость материала, после термообработки, составляла в пределах 30–40 HRC, что подтверждается результатами испытаний, приведенными на рисунках 4.10, 4.11 и 4.12.



а)

б)

а) для малых размеров, б) для больших размеров

Рисунок 4.9 – Чертёж втулки

На рисунке 4.11 представлена головка, изготовленная с учетом установки дополнительной втулки. Этот компонент был разработан для использования в процессе прокатки на автоматическом стане ТПА 220. Головка представляет собой важную деталь, которая обеспечивает правильное положение и стабильную работу оправки с дополнительной втулкой. Конструкция головки учитывает все необходимые параметры для эффективной работы на автоматическом стане, а также обеспечивает надежную фиксацию втулки, предотвращая ее смещение в процессе раскатки.

На рисунке 4.12 изображен оправочный узел в сборе. Эта сборка является ключевым элементом для проведения опытной прокатки на автоматическом стане ТПА 220. Новый оправочный узел позволяет предотвратить образования дефектов, таких как концевые складки, благодаря оптимальной фиксации и движению в процессе прокатки. Дополнительная втулка способствует улучшению качества продукции, снижая вероятность повреждения и износа инструментов. Сборка выполнена с учетом всех технологических требований, что обеспечивает высокую эффективность и надежность при эксплуатации.



Рисунок 4.10 – Готовые втулки



Рисунок 4.11 – Головка оправочного узла



Рисунок 4.12 – Спутник с оправкой и втулкой в сборе ТПА 220

4.5.2 Инструменты, используемые в экспериментальной прокатке на стане ТПА 220

На стане ТПА 220 была проведена опытная прокатка с использованием дополнительной втулки в качестве направляющего инструмента для трубного сортамента $\text{Ø}219 \times 7$, изготовленного из стали марки 20А по ГОСТ 8732–78 [52] и ГОСТ 8731–74 [53], группа Б. Диаметр заготовки составил $\text{Ø}215$ мм. Использование дополнительной втулки позволило улучшить геометрические параметры продукции, снизив вероятность образования дефектов, таких как концевые складки. Прокатка была проведена в производственных условиях, что обеспечило получение точных и надежных данных, необходимых для оптимизации технологического процесса и дальнейшего повышения качества труб [50].

4.5.3 Этапы экспериментальной прокатки на стане ТПА 220

Опытная работа была проведена в два этапа. На первом этапе прокатка проводилась по существующей технологии, без использования дополнительной втулки, что позволило получить результаты по стандартному процессу. На втором этапе прокатка выполнялась с установкой дополнительной втулки на спутник, что позволило исследовать влияние данного инструмента на качество и геометрические параметры прокатываемых труб. Параметры прокатки для обоих этапов приведены в таблице 4.3. Это позволило провести сравнительный анализ и выявить изменения в результатах, таких как уменьшение образования дефектов, улучшение геометрических характеристик труб и повышение их качества [50].

Таблица 4.3 – Параметры прокатки на автоматическом стане ТПА 220

Размеры трубы, мм $D \times S$	Диаметр оправки, мм		Диаметр втулки, мм		Длина втулки, мм	Размеры гильзы, мм $D_r \times S_r$	Обжатие по стенке, %	
	1-пр	2-пр	1-пр	2-пр			1-пр	2-пр
219×7,0	200	203	198	201	60	231×14	39,2	16,2

4.5.4 Результаты экспериментальной прокатки на автоматическом стане ТПА 220

После каждого этапа опытной прокатки были зафиксированы фотографии готовых труб, размещенных на охлаждающем столе, представленные на рисунках 4.13 и 4.14. На этих изображениях можно наблюдать результаты прокатки с учетом применения дополнительной втулки. При прокатке с использованием втулки размер концевых складок уменьшился почти в два раза, что видно на рисунках 4.25 и 4.26. Однако, несмотря на

заметное снижение их размера, концевые «плавники» не исчезли полностью, что может быть связано с неровными концами и большой разностенностью гильз после прошивки.

На рисунке 4.25 показаны изображения готовых труб на охлаждающем столе. Складки на концах труб по длине достигают до 200 мм, а по ширине — до 90 мм. Это указывает на наличие дефектов, которые требуют дальнейшего внимания и корректировки технологических процессов для их минимизации [50].



Рисунок 4.13 – Трубы на охлаждающем столе после прокатки на ТПА 220 без дополнительной втулки

На рисунке 4.13 приведены изображения готовых труб, размещенных на охлаждающем столе. Складки на концах труб по длине достигают до 100 мм, а по ширине — до 50 мм. Эти дефекты свидетельствуют о наличии концевых складок, которые могут влиять на качество конечной продукции. В дальнейшем необходимо провести дополнительные исследования и корректировки технологии для минимизации этих дефектов и повышения точности производства труб [50].



Рисунок 4.14 – Трубы на охлаждающем столе после экспериментальной прокатки на ТПА 220 при использовании дополнительной втулки [50]

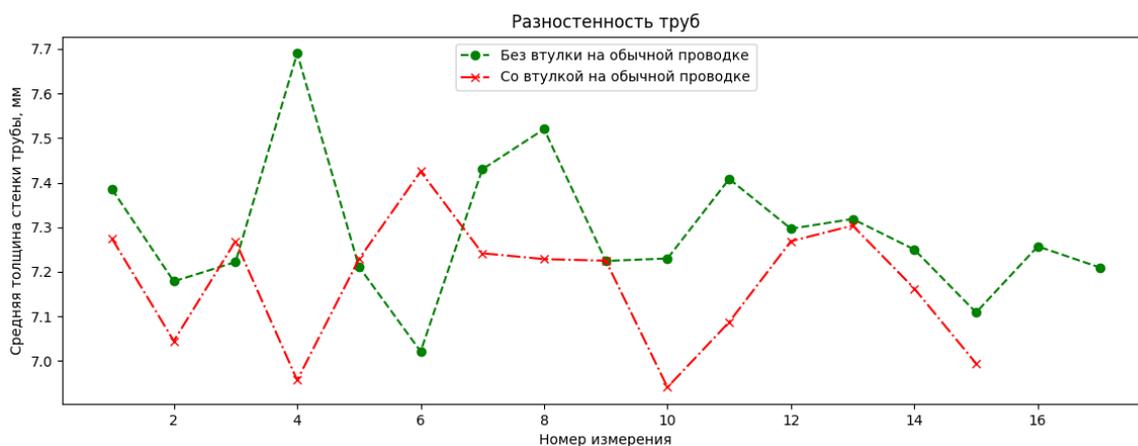


Рисунок 4.15 – График зависимости средней толщины стенки готовых труб

На рисунке 4.15 зафиксированы толщины готовых труб после первого и второго этапа опытной работы. При прокатке без направляющей втулки был зафиксирован средний разброс по толщине стенки труб, составляющий 0,670 мм. В то время как после установки дополнительной втулки на втором этапе разброс толщины уменьшился до 0,485 мм.

Эти результаты показывают положительную тенденцию к улучшению точности прокатки, но однозначный вывод сделать сложно, поскольку на разностенность труб влияют множество факторов, таких как особенности материала, параметры прокатки и другие технологические параметры. Дополнительные исследования, включая изменение условий прокатки и более детализированное моделирование, помогут выявить наиболее значимые из этих факторов и оптимизировать процесс для достижения минимального отклонения в толщине стенки.

4.5.5 Анализ состояния инструмента после экспериментальной прокатки

После 70 проходов втулка первого прохода сломалась, как показано на рисунке 4.16. Несмотря на поломку, наружная поверхность втулки изнашивалась незначительно, что свидетельствует о низком уровне износа материала при эксплуатации. Это может говорить о высоких эксплуатационных свойствах используемого материала для втулки, однако поломка после столь ограниченного числа проходов требует дополнительного анализа причин отказа, таких как возможно недостаточная прочность конструкции в местах нагрузки. Дополнительные испытания и улучшение конструкции втулки могут способствовать улучшению её долговечности в процессе прокатки.



Рисунок 4.16 – Втулка первого прохода после 70 проходов

Затем была установлена запасная втулка для первого прохода. Однако, как показано на рисунке 4.17 [50], втулка сломалась на том же месте, что и предыдущая, после 70 проходов. Этот повторяющийся дефект указывает на потенциальную слабость в конструкции втулки или в процессе её эксплуатации. Возможно, места повышенной нагрузки или стрессовых концентраций, такие как соединения и участки крепления втулки, подвержены разрушению. Необходимо провести более глубокий анализ прочностных характеристик материала втулки, а также выявить возможные причины повторного разрушения, такие как чрезмерные нагрузки, недостаточная термическая обработка или возможные дефекты материала. На основании этих данных можно будет разработать рекомендации по улучшению конструкции втулки для повышения её устойчивости к износу и разрушению.



Рисунок 4.17 – Втулка с первого прохода после 70 проходов

На втулке со второго прохода, после 140 проходов труб, больших повреждений не обнаружено, как показано на рисунке 4.19. Это свидетельствует о более высокой износостойкости и долговечности втулки второго прохода по сравнению с втулкой первого прохода [50]. Отсутствие значительных повреждений может быть связано с улучшенной конструкцией втулки, правильным выбором материала или оптимальными условиями эксплуатации во втором проходе. Этот результат подтверждает, что втулки, которые подвергаются меньшему воздействию нагрузки, имеют значительно большую стойкость и срок службы. Однако для окончательных выводов потребуется дополнительный анализ факторов, влияющих на повреждения втулок в первом и втором проходах.



Рисунок 4.18 – Оправочный узел после первого прохода прокатки

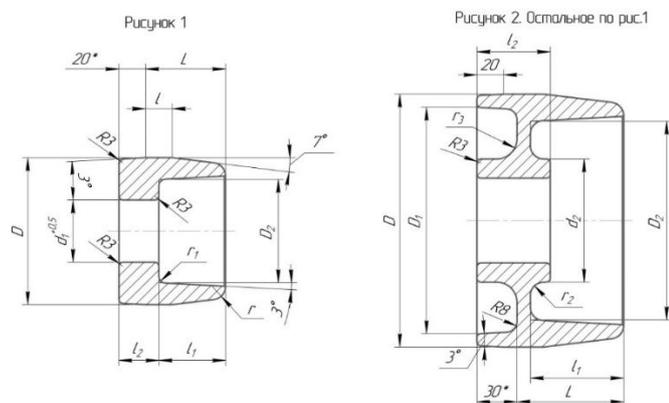


Рисунок 4.19 – Оправочный узел после второго прохода прокатки

По результатам анализа было принято решение изменить конструкцию втулки с целью предотвращения поломки на месте фиксации с головкой [50]. Это решение основывается на выявленных недостатках в текущей конструкции втулки, где место фиксации с головкой подвергается избыточному механическому воздействию, что ведет к её разрушению после определённого числа проходов. Для повышения долговечности и износостойкости втулки планируется улучшить конструктивные особенности, возможно, путем усиления материала в критичных зонах и перераспределения нагрузки на втулку. Также будут рассмотрены альтернативные способы крепления, чтобы снизить напряжения в месте фиксации и повысить общую надежность инструмента в процессе эксплуатации.

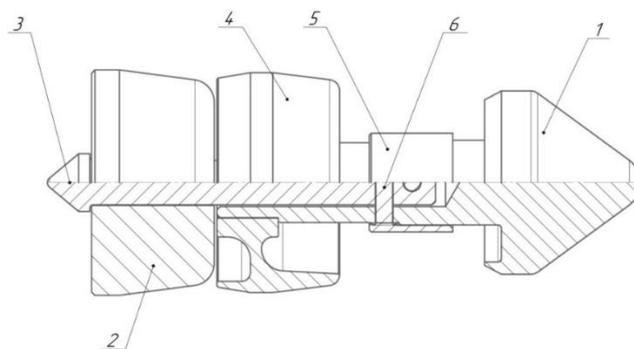
4.5.6 Корректировка конструкции инструмента

По результатам опытной прокатки было принято решение изменить профиль втулки в связи с преждевременной поломкой инструментов. Для повышения долговечности и предотвращения поломки инструмента необходимо увеличить длину рабочей части втулки, что позволит распределить нагрузку на более продолжительную область и уменьшить концентрацию напряжений в критичных точках. Также важно увеличить длину фиксирующего участка на головке и втулке, чтобы обеспечить более надежную фиксацию и снизить вероятность повреждения на месте соединения с головкой [50]. Эти изменения помогут улучшить эксплуатационные характеристики втулки, повысить её износостойкость и обеспечить более стабильную работу инструмента на протяжении большего числа проходов. Рисунки 4.20, 4.21 и 4.22 иллюстрируют предложенные изменения в конструкции втулки и фиксирующего участка.



1 – для малых размеров, 2 – для больших размеров

Рисунок 4.20 – Чертёж втулок с учётом корректировок



1 – головка; 2 – оправка; 3 – шпилька; 4 – втулка; 5 – гайка; 6 – штифт

Рисунок 4.21 – Оправочный узел новой конструкции

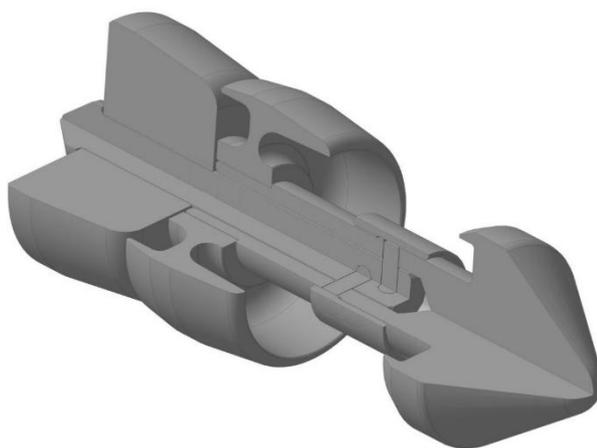


Рисунок 4.22 –Трёхмерная модель оправочного узла

4.6 Выводы по главе

1. Моделирование в среде «QForm»:

В ходе моделирования процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220 были установлены ключевые зависимости:

- при относительном обжатии по стенке в первом проходе от 30,0% начинают образовываться дефекты в виде складок («плавников») на конце черновой трубы.
- при относительном обжатии стенки в первом проходе до 38,4% установка дополнительной втулки эффективно предотвращает образование дефектов «плавников» в конце черновой трубы.
- при относительном обжатии по стенке в первом проходе 38,4% и выше установка втулки уже не предотвращает образование дефектов на задних концах черновой трубы.
- оптимальное расстояние между оправкой автоматического стана и втулкой составляет от 0 до 30 мм, что обеспечивает максимальную эффективность при предотвращении дефектов.

2. Моделирование с пониженной толщиной стенки гильзы:

Дополнительное моделирование с пониженной толщиной стенки гильзы показало, что уменьшение относительного обжатия по толщине стенки в первом проходе [25], в сочетании с использованием дополнительной втулки на спутнике с оправкой, значительно снижает образование концевых складок. Однако для реализации понижения толщины стенки гильзы на прошивном стане необходимы точные настроечные параметры, что требует использования специализированной компьютерной программы «Eisen v2.0». Эта программа может быть эффективно применена в производственных условиях для точных расчетов и настройки параметров прокатки.

3. Испытания на прочность втулки в среде «SolidWorks Simulation»:

Моделирование прочности втулки показало, что:

- внешние нагрузки, оказываемые на втулку, не превышают предела текучести материала, что подтверждает её прочность в процессе эксплуатации.

- втулку рекомендовано изготовить из легированной стали, что обеспечит её высокую износостойкость.

- при установке дополнительной втулки на спутник с оправкой масса конструкции оправочного узла увеличивается на примерно 2,25–10,5 кг, что следует учитывать при расчете нагрузки на оборудование.

4. Опытная прокатка на ТПА 220:

Результаты опытной прокатки на стане ТПА 220 показали следующие:

- при использовании дополнительных втулок размеры концевых складок на трубах существенно уменьшаются, что свидетельствует о повышении качества продукции.

- поломка втулок связана с неудовлетворительной конструкцией их фиксации с головкой. Для дальнейшего применения втулок в производственном процессе внесены изменения в конструкцию оправочного узла [50].

Данные результаты предоставляют значительный вклад в улучшение технологического процесса прокатки на автоматическом стане ТПА 220 и могут быть использованы для оптимизации и повышения качества производимой продукции.

Глава 5. Исследование прокатки труб на автоматическом стане с цилиндрической оправкой

Настоящая глава диссертационной работы посвящена исследованию процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220 и ДУО-210 лаборатории МИСИС с использованием разных типов оправок, а именно конусных и цилиндрических оправок. Результаты моделирования процесса прокатки на автоматическом стане были получены с использованием программной среды «QForm».

5.1 Геометрические параметры калибров

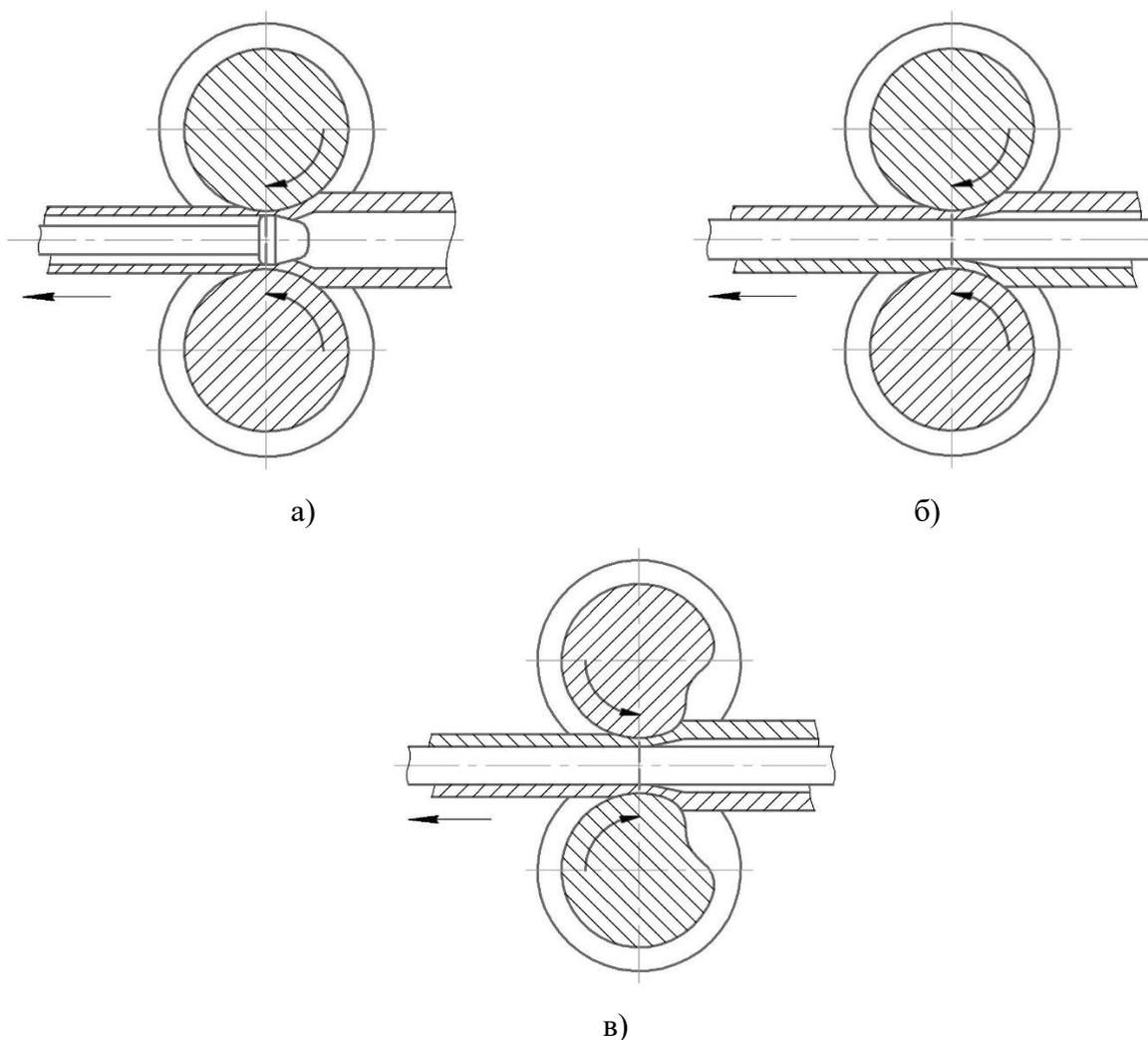
Все технологические процессы прокатки труб в круглых калибрах можно разделить на две основные группы: прокатка в калибрах на оправке и без оправки [1].

Процессы первой группы применяют для раскатки толстостенных гильз в сравнительно тонкостенные трубы. При этом происходит значительное обжатие стенки гильзы с уменьшением ее диаметра. Процессы второй группы имеют главной целью уменьшение диаметра труб, причем толщина их стенки может либо уменьшаться, либо увеличиваться, либо сохраняться неизменной [1].

К процессам первой группы относятся три основных способа прокатки труб на оправке (рис. 5.1): прокатка на неподвижной короткой оправке – пробке; прокатка на цилиндрической оправке, движущейся вместе с гильзой трубой через калибры валков; периодическая прокатка на цилиндрической оправке в калибрах переменного профиля (пилигримовая прокатка) [1].

Прокатка труб на короткой неподвижной оправке между двумя калиброванными валками применяется на установках автоматическим станом, а также в новых полунепрерывных трубопрокатных агрегатах с двухклетевым станом конструкции ВНИИМЕТМАШ и ЭЗТМ [1].

Прокатка труб на цилиндрической оправке в круглых калибрах осуществляется на непрерывных трубопрокатных станах. Разновидностью этого процесса является непрерывная прокатка на удерживаемой цилиндрической или суживающейся оправке (рис. 5.1), которая принудительно перемещается во время прокатки на величину шага клетей со скоростью, меньшей, чем скорость движения трубы ($v_0 < v_T$) [1].



а) – на короткой оправке; б) – на цилиндрической оправке; в) – пилигровая прокатки

Рисунок 5.1 –Схема прокатки труб [1]

5.2 Прокатка на автоматическом стане

Традиционный процесс прокатки труб на автоматическом стане сопровождается повышенным износом неподвижной конической оправки из-за воздействия сил трения и высокого давления металла на оправку, что негативно сказывается на качестве внутренней поверхности труб. При прокатке легированных сталей оправку заменяют после 2...3 пропусков. В связи с этим актуальной задачей является разработка альтернативных способов раскатки труб в автоматическом стане.

5.3 Новый способ прокатки на автоматическом стане

В ходе прокатки на непрерывных станах цилиндрическая оправка перемещается вместе с прокатываемой гильзой с постоянной скоростью, в то время как в случае

прокатки на автоматическом стане скорость цилиндрической оправки заметно ниже (приблизительно в 5 раз) линейной скорости прокатки [3]. В процессе прокатки с цилиндрической оправкой на автоматическом стане гильза после прохождения прокатки на прошивном стане, передается на автоматический стан. Цилиндрическая оправка изначально размещается на входном участке автоматического стана, после чего устанавливается в гильзу. Затем цилиндрическая оправка, вместе с гильзой, подается в очаг деформации автоматического стана.

Новый способ прокатки на автоматическом стане предполагает объединение двух типов процесса раскатки: на автоматическом стане с короткой неподвижной оправкой и на непрерывном стане с цилиндрической оправкой. Метод прокатки на автоматическом стане с цилиндрической оправкой включает следующую последовательность шагов:

1. После прокатки на прошивном стане гильза поступает во входной желоб автоматического стана;
2. С входной стороны цилиндрическая оправка начинает двигаться в полость гильзы и оказывается внутри гильзы;
3. Затем, с использованием привода оправки, гильза вместе с цилиндрической оправкой подается в очаг деформации, и начинается продольная прокатка;
4. В ходе прокатки цилиндрическая оправка движется со скоростью, меньшей скорости прокатки;
5. После первого прохода передний конец оправки возвращается в очаг деформации, а гильза с помощью толкателя на выходной стороне стана надевается на оправку и кантуется на 90° ;
6. Затем, после кантования, осуществляется реверс валков, и оправка вместе с гильзой подается в очаг деформации на второй проход;
7. По завершении второго прохода оправка возвращается в исходное положение;
8. С помощью толкателя на выходной стороне стана черновая труба выталкивается на входной участок и попадает во входной желоб;
9. Черновая труба, прокатанная на автоматическом стане, направляется на последующую обработку в обкатных машинах.

Основными преимуществами метода прокатки на автоматическом стане с цилиндрической оправкой являются высокая точность труб. Однако основными недостатками данного процесса являются необходимость модернизации стана и значительные затраты на эту модернизацию.

5.4 Моделирование процесса прокатки на автоматическом стане ТПА 220 с цилиндрической оправкой

Проведено моделирование процесса прокатки на автоматическом стане с использованием цилиндрической сплошной оправки, основанное на данных таблиц прокатки трубопрокатного агрегата ТПА 220 (таблицы 1 и 2). Исследование моделирования было проведено для тонкого сортамента труб с общим относительным обжатием более 38% на автоматическом стане. Основные параметры прокатки включают следующие условия:

- частота вращения валков: 80 об/мин;
- температура гильзы: 1000°C;
- коэффициент трения: 0,15;
- температура окружающей среды: 20°C.

Таблица 5.1 – Таблица прокатки ТПА 220

№	Размер труб, мм		Dз, мм	Длина заготовки, м		Прошивной стан										Автоматстан							Обкатные машины			Dтр после калиб. стана	Суммарный коэффициент вытяжка	
						гильза		расст. между		№ поз. лин	оправка		стержень		Коэф. выг.	Hк ном	Hк факт	Sa	1- пр	2- пр	Dст	Коэф. выг.	Σ, %	Dоб	Dоп			Dст
	Dтр	Стр		min	max	Dг	Sг	вал	лин		D	Lр	D	Уст														
1	114	7,0	120	1,30	2,68	128	11,5	107	116	1	98	205	89	213	2,69	118	118	7,0	102	104	95	1,69	39,1	120,5	106	95	115,5	4,71
2	121	5,0	115	1,19	2,05	128	9,5	102	110	0	102	215	95	206	2,94	118	118	5,0	106	108	89	1,96	47,3	127,5	110	102	122,5	5,59
3	127	5,0	120	1,18	2,03	137	9,5	107	116	1	108	225	102	180	2,97	127	127	5,0	115	117	108	1,95	47,3	133,5	119	108	128,5	5,78
4	133	5,0	130	1,04	1,80	142	9,5	113	122	2	110	225	102	195	3,36	132	132	5,0	120	122	102	1,95	47,3	139,5	124	108	134,5	6,47
5	140	5,0	140	0,95	1,64	149	9,5	120	133	3	120	240	110	196	3,70	139	139	5,0	127	129	110	1,95	47,3	146,5	131	120	141,5	7,11
6	146	5,0	150	0,91	1,49	156	10,0	129	139	4	126	251	110	195	3,85	145	145	5,0	133	135	110	2,06	50	153,0	137	120	148,0	7,82
7	152	5,0	150	0,95	1,56	163	10,0	130	141	4	134	253	120	160	3,68	152	152	5,0	140	142	120	2,05	50	159,0	144	120	154,0	7,50
8	159	4,5	150	0,94	1,46	168	9,5	133	144	12	138	266	135	170	3,74	157	157	4,5	146	148	135	2,16	47,3	166,0	150	120	161,0	7,93
9	168	6,0	160	1,00	1,80	178	11,0	141	152	5	146	272	135	155	3,48	167	167	6,0	153	155	135	1,88	45,4	175,0	157	120	170,0	6,45
10	178	6,0	180	0,90	1,55	192	11,0	160	173	7	160	290	145	121	4,07	181	181	6,0	167	169	145	1,87	45,4	185,0	171	120	180,0	7,69
11	180	6,0	180	0,90	1,55	192	11,0	156	168	7	160	290	145	150	4,07	181	181	6,0	167	169	145	1,87	45,4	187,0	171	120	182,0	7,60
12	194	6,0	190	0,90	1,48	205	11,5	165	178	8	170	278	160	140	4,06	193	193	6,0	179	181	160	1,96	47,8	201,5	183	120	196,5	7,84
13	203	8,0	210	0,90	1,80	217	13,5	183	196	9	178	285	160	140	4,01	205	205	8,0	187	189	170	1,73	40,7	210,5	191	120	205,5	6,93
14	219	7,0	210	0,90	1,59	229	12,5	187	204	10	190	320	160	125	4,07	216	217	7,0	201	203	170	1,82	44	226,5	205	120	221,5	7,28

Таблица 5.2 – Таблица прокатки с параметрами цилиндрической оправки ТПА 220

№	Размер труб		Автоматстан												
			Hк ном	Hк факт	Sa	1-пр	2-пр	Dст	Коэф. выг.	Σ	Диаметр валка по центру	Частота вращения	Линейная скорость движения гильзы	Скорость движения оправки	
	мм	мм												мм/мин	мм/с
1	114	7,0	118	118	7,0	102	104	95	1,69	39,1	662	120	2,080	0,416	6,932
2	121	5,0	118	118	5,0	106	108	89	1,96	47,3	662	120	2,080	0,416	6,932
3	127	5,0	127	127	5,0	115	117	108	1,95	47,3	653	120	2,051	0,410	6,838
4	133	5,0	132	132	5,0	120	122	102	1,95	47,3	648	120	2,035	0,407	6,785
5	140	5,0	139	139	5,0	127	129	110	1,95	47,3	641	120	2,014	0,403	6,712
6	146	5,0	145	145	5,0	133	135	110	2,06	50	635	120	1,994	0,399	6,650
7	152	5,0	152	152	5,0	140	142	120	2,05	50	628	120	1,972	0,394	6,566
8	159	4,5	157	157	4,5	146	148	135	2,16	47,3	623	120	1,957	0,391	6,516
9	168	6,0	167	167	6,0	153	155	135	1,88	45,4	613	120	1,925	0,385	6,416
10	178	6,0	181	181	6,0	167	169	145	1,87	45,4	599	120	1,881	0,376	6,266
11	180	6,0	181	181	6,0	167	169	145	1,87	45,4	599	120	1,881	0,376	6,266
12	194	6,0	193	193	6,0	179	181	160	1,96	47,8	587	120	1,844	0,369	6,147
13	203	8,0	205	205	8,0	187	189	170	1,73	40,7	575	120	1,806	0,361	6,016
14	219	7,0	216	217	7,0	201	203	170	1,82	44	564	120	1,772	0,364	5,906

5.4.1 Процесс прокатки на автоматическом стане ТПА-220 с цилиндрической оправкой

Проведено моделирование процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220. Результаты моделирования представлены на рисунках 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 и 5.7. Усилия прокатки иллюстрированы на рисунках 5.2 и 5.3. Геометрические параметры черновой трубы показаны на рисунках 5.4 и 5.5.

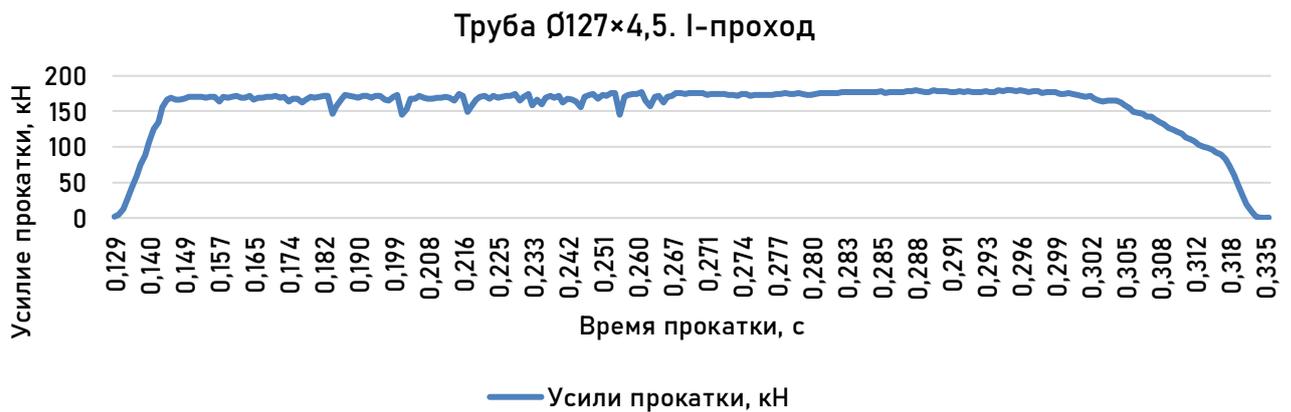


Рисунок 5.2 – Усилие прокатки на I-проходе

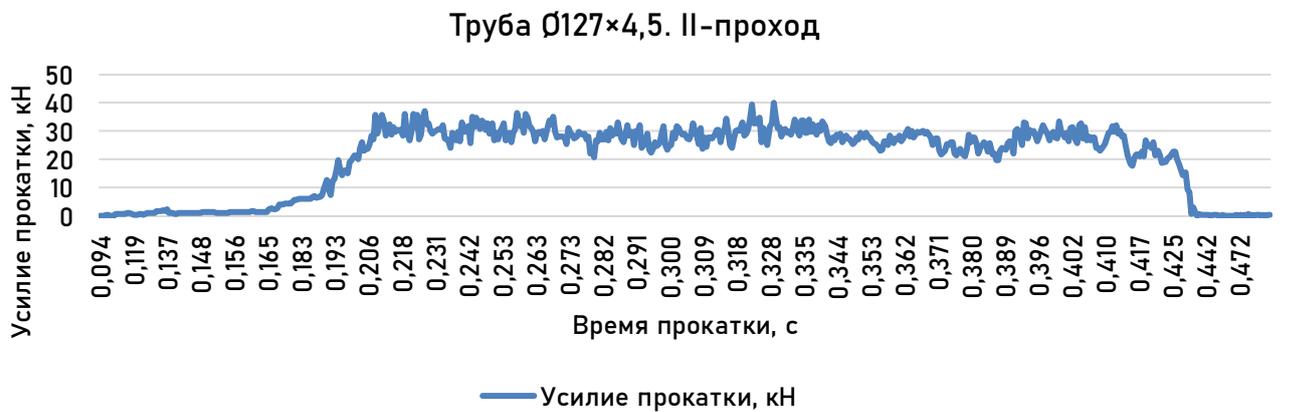


Рисунок 5.3 – Усилие прокатки на II-проходе

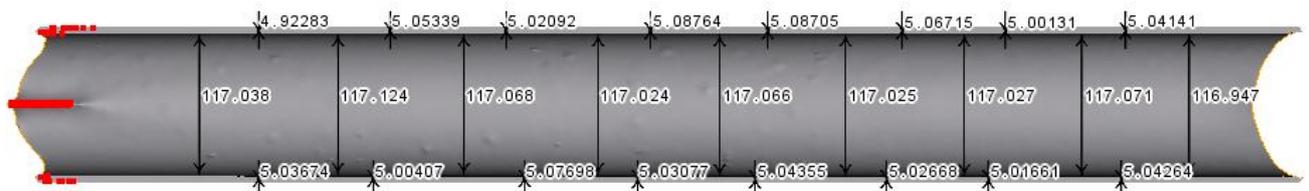


Рисунок 5.4 – Черновая труба в вертикальном сечении. Труба $\text{Ø}127 \times 4,5$

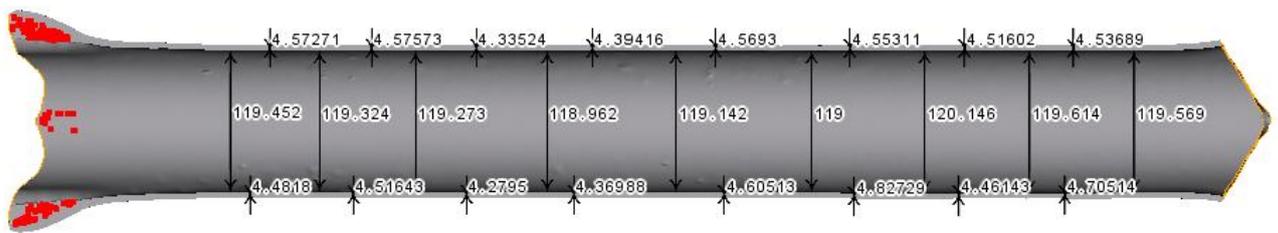


Рисунок 5.5 – Черновая труба в горизонтальном сечении. Труба Ø127×4,5

5.4.2 Отклонение от номинальных размеров труб при прокатке на автоматическом стане с цилиндрической оправкой

Результаты отклонений геометрических параметров черновой трубы от номинальных значений представлены на рисунках 5.6 и 5.7. Эти отклонения являются наглядным отображением анализа, проведенного в ходе исследования моделированием процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220. Рисунки 5.6 и 5.7 иллюстрируют вариации в геометрии трубы, что позволяет более детально оценить степень соответствия полученных значений установленным стандартам и требованиям.

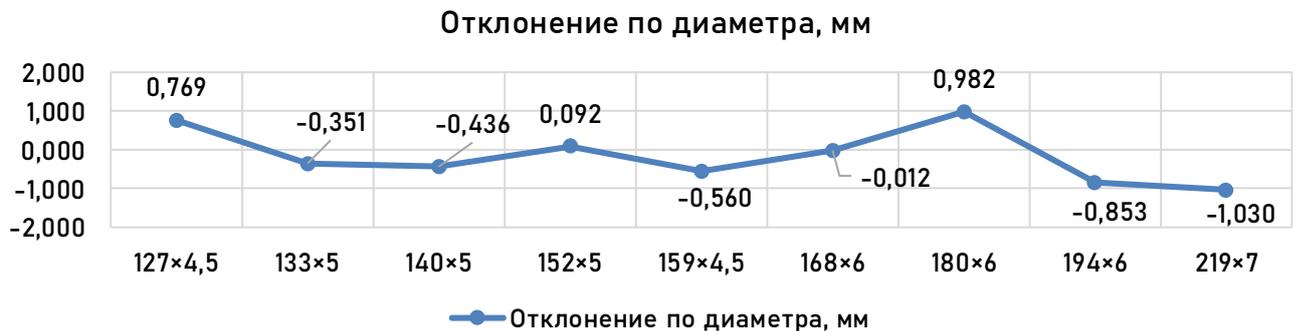


Рисунок 5.6 – Отклонение фактического диаметра от номинального при прокатке на цилиндрических оправках



Рисунок 5.7 – Отклонение фактической толщины от номинальной

5.5 Моделирование прокатки на автоматическом стане с конической оправкой

5.5.1 Процесс прокатки на автоматическом стане ТПА-220. Труба $\text{Ø}127 \times 4,5$

В рамках исследования выполнено моделирование процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220 по таблице прокатки (табл. 5.1 и 5.2). Результаты моделирования представлены на рисунках 5.8–5.11.

Графики усилия прокатки, отображённые на рисунках 5.8 и 5.9, позволяют провести детальный анализ изменений данного параметра на различных этапах процесса. Геометрические параметры черновой трубы представлены на рисунках 5.10 и 5.11, что даёт возможность визуально оценить соответствие полученных значений установленным нормам.

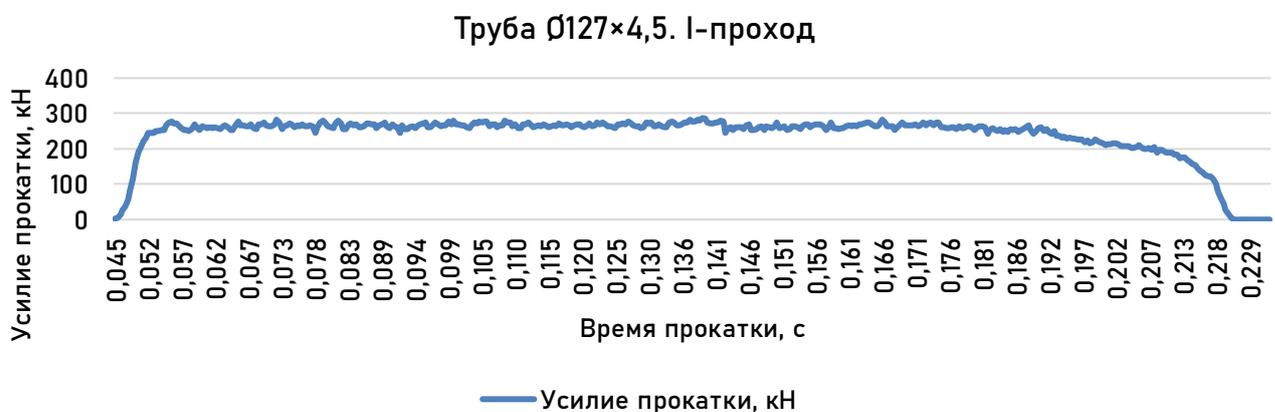


Рисунок 5.8 – Усилие прокатки в I-проходе

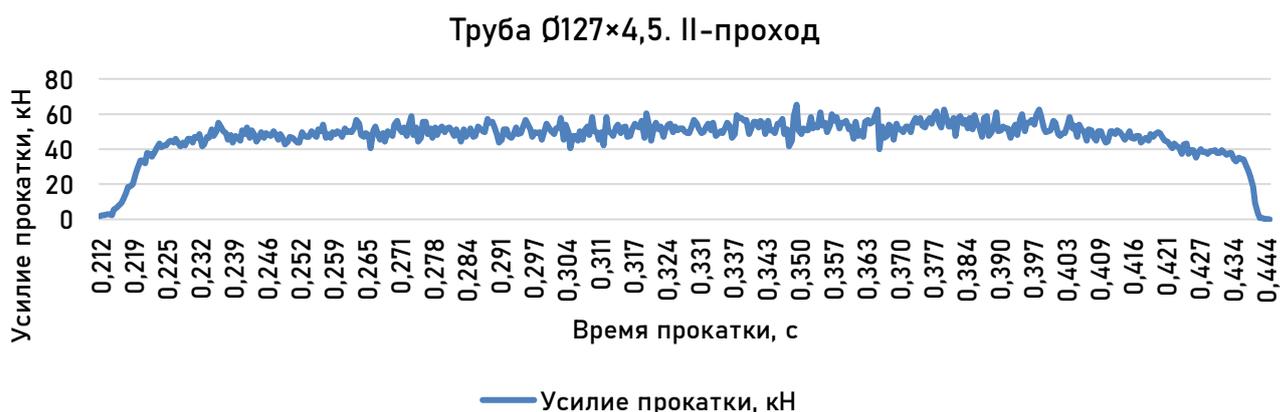


Рисунок 5.9 – Усилие прокатки в II-проходе

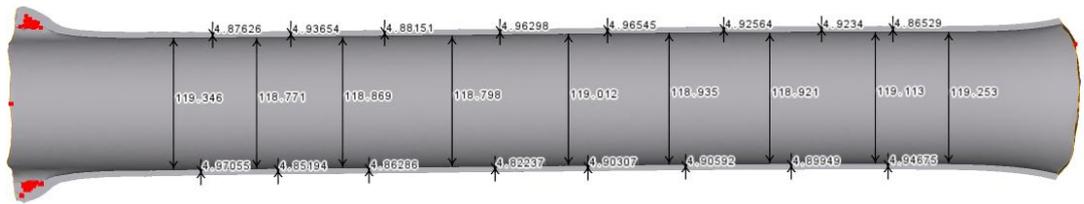


Рисунок 5.10 – Черновая труба в горизонтальном сечении. Труба $\text{Ø}127 \times 4,5$

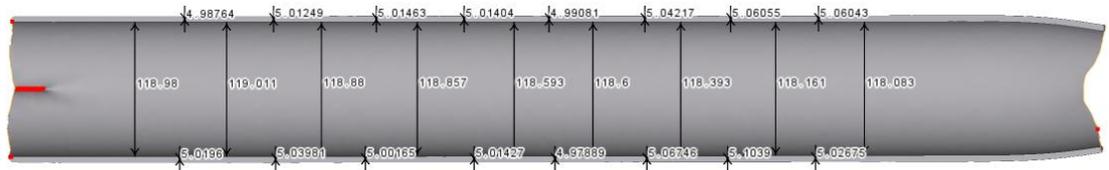


Рисунок 5.11 – Черновая труба в вертикальном сечении. Труба $\text{Ø}127 \times 4,5$

5.5.2 Отклонение от номинальных размеров труб при прокатке на автоматическом стане с конической оправкой

Отклонения геометрических параметров черновой трубы от номинальных размеров подробно показаны на рисунках 5.12 и 5.13. Представленные графики позволяют визуализировать различия между фактическими и расчетными размерами, что играет ключевую роль в оценке точности и качества процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220.



Рисунок 5.12 – Отклонение фактического диаметра от номинального



Рисунок 5.13 – Отклонение фактической толщины от номинальной

5.6 Сравнительный анализ прокатки на автоматическом стане с цилиндрической и конической короткой оправкой

Приведены данные о максимальных усилиях в I-проходе (рис. 5.14) для различных типов оправок при прокатке на автоматическом стане.

На рисунке представлено сравнение максимальных усилий прокатки металла на оправку в первом проходе для различных профилей труб. По оси абсцисс указаны размеры профилей, по оси ординат – величина усилия прокатки в килоньютонах (кН). Величины усилий рассчитаны для двух типов оправок: конических коротких (отмечены синим цветом) и цилиндрических длинных (отмечены красным цветом).

Анализ представленных данных показывает, что усилие на оправку для конических коротких оправок превышает аналогичные показатели для цилиндрических длинных на всех исследуемых профилях труб. Например, для профиля $\text{Ø}127 \times 4,5$ усилие составляет 287 кН для конической оправки против 180 кН для цилиндрической. Для профиля $\text{Ø}159 \times 4,5$ значения усилий равны 392 кН и 238 кН соответственно. Наибольшее значение усилия зафиксировано для профиля $\text{Ø}219 \times 7$: 465 кН для конической оправки и 333 кН для цилиндрической.

Таким образом, использование цилиндрических длинных оправок позволяет существенно снизить величину усилий прокатки, что делает их более предпочтительными с точки зрения энергоэффективности процесса.



Рисунок 5.14 – Усилия в I-проходе при прокатке с цилиндрической и конической оправкой

На рисунке 5.15 представлено сравнение максимальных усилий прокатки металла на оправку во втором проходе для различных профилей труб. По оси абсцисс указаны размеры профилей, по оси ординат – величина усилия прокатки в килоньютонах (кН). Значения усилий

рассчитаны для двух типов оправок: конических коротких (отмечены синим цветом) и цилиндрических длинных (отмечены красным цветом).

Данные свидетельствуют о том, что усилие на оправку для конических коротких оправок, как правило, превышает соответствующие показатели для цилиндрических длинных оправок. Например, для профиля $\text{Ø}127 \times 4,5$ усилие составляет 65 кН для конической оправки против 40 кН для цилиндрической. Для профиля $\text{Ø}159 \times 4,5$ эти показатели равны 171 кН и 91 кН соответственно. Наибольшее усилие прокатки зафиксировано для профиля $\text{Ø}219 \times 7$: 244 кН для конической оправки и 142 кН для цилиндрической.

На представленном графике (рис. 5.18) изображено отклонение по диаметру труб после прокатки для различных профилей. Отклонение выражено в миллиметрах и нанесено по оси ординат, а профиль трубы — по оси абсцисс. Сравнение выполнено для двух типов оправок: конических коротких (обозначены синим цветом) и цилиндрических длинных (обозначены красным цветом).



Рисунок 5.15 – Усилия во II-проходе при прокатке с цилиндрической и конической оправкой

Анализ данных показывает, что отклонения по диаметру имеют как положительные, так и отрицательные значения, что свидетельствует о превышении либо недоборе размеров относительно номинального диаметра (рис. 5.16).

Наибольшее положительное отклонение наблюдается для профиля $\text{Ø}180 \times 6$ при использовании конических коротких оправок (2,05 мм). Наименьшее положительное отклонение зафиксировано для профиля $\text{Ø}152 \times 5$, равное 1,18 мм. Для цилиндрических оправок максимальное положительное отклонение также отмечается для профиля $\text{Ø}180 \times 6$ (0,98 мм),

тогда как отрицательные отклонения достигают своего максимума на профилях $\text{Ø}219\times 7$ и $\text{Ø}159\times 4,5$ (оба с результатом $-1,03$ мм).

Из результатов можно заключить, что использование цилиндрических оправок приводит к более стабильным результатам по диаметру, так как отклонения в большинстве случаев ниже, чем при использовании конических коротких оправок. Это указывает на их более высокий потенциал для обеспечения точности размеров продукции.

На представленном графике (рис. 5.17) показано отклонение по толщине стенки труб после прокатки для различных профилей. Отклонения приведены в миллиметрах по оси ординат, а на оси абсцисс указаны размеры профилей. Сравнение выполнено между коническими короткими оправками (отмечены синим цветом) и цилиндрическими длинными оправками (отмечены красным цветом).

Анализ графика демонстрирует, что конические короткие оправки в большинстве случаев обеспечивают большее положительное отклонение по толщине стенки. Максимальное значение положительного отклонения для конических оправок составляет $1,11$ мм и наблюдается на профиле $\text{Ø}180\times 6$, минимальное — $0,08$ мм для профиля $\text{Ø}159\times 4,5$.

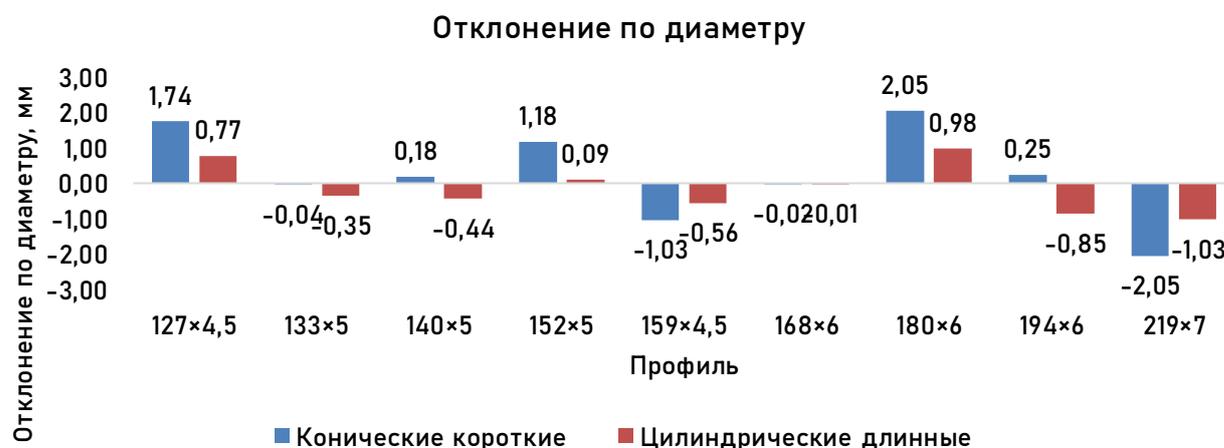


Рисунок 5.16 – Отклонение по диаметру при прокатке с цилиндрической и конической оправками

Для цилиндрических длинных оправок значения отклонений, как правило, меньше. Максимальное положительное отклонение составляет $0,28$ мм для профиля $\text{Ø}127\times 4,5$, а максимальное отрицательное значение — $-0,21$ мм для профиля $\text{Ø}133\times 5$.

Отрицательные отклонения для конических оправок также встречаются, например, для профиля $\text{Ø}168\times 6$, где значение составляет $-0,92$ мм, что является минимальным отрицательным отклонением среди всех случаев.

Таким образом, можно сделать вывод, что цилиндрические длинные оправки обеспечивают более стабильные параметры толщины стенки, что может свидетельствовать об

их большей пригодности для получения точных геометрических размеров изделий. Конические короткие оправки показывают больший разброс значений, что объясняется более высокими усилиями на оправку, смещающими ее с оси прокатки.

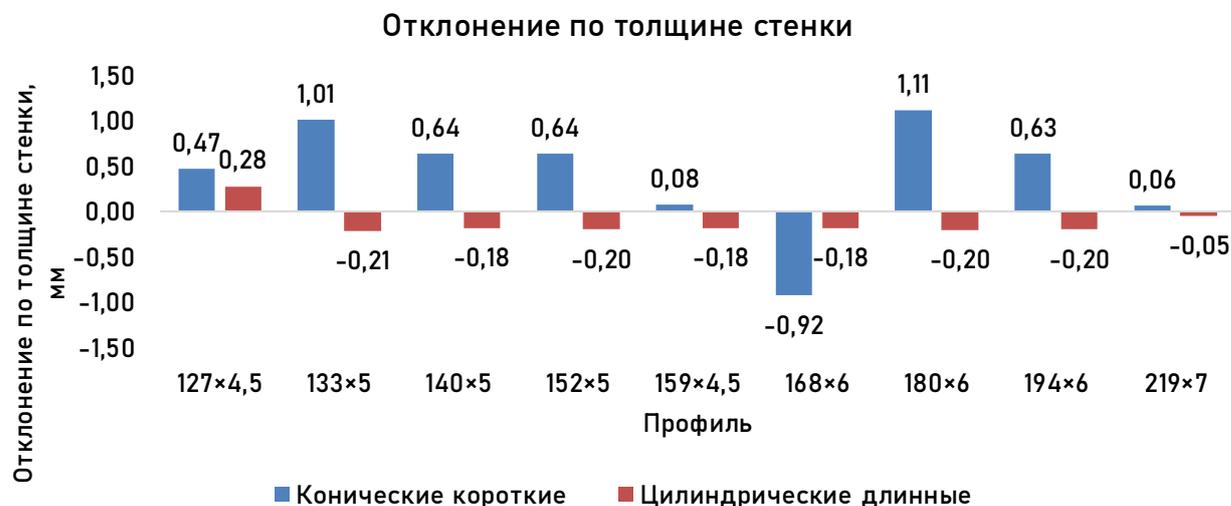


Рисунок 5.17 – Отклонение по толщине стенки при прокатке с цилиндрической и конической оправками

5.7 Исследование процесса раскатки на стане ДУО-210 с цилиндрической оправкой

С целью анализа силовых и геометрических параметров процесса раскатки было проведено компьютерное моделирование прокатки на цилиндрической оправке.

В рамках исследования использовались трубы диаметром $\varnothing 45$ мм с толщиной стенки 5,5 мм и длиной 200 мм. Скорость движения оправки и частота вращения валков во время прокатки составляла 30 мм/с и 10 об/мин соответственно.

Моделирование в среде «QForm» было выполнено для профиля $\varnothing 42 \times 4$

Исходные данные моделирования приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Исходные данные моделирования

Параметры	Значение
Материал заготовки	13ХФА
Начальная температура заготовки	1180
Частота вращения валков	10 об/мин (80 ± 1 мм/с)
Фактор трения между оправкой и заготовкой	0,15
Начальная температура валков	80°C
Материал оправки	4Х5МФС
Начальная температура оправки	100°C

5.7.1 Усилие металла на оправку в I-проходе

На приведённой диаграмме (рис. 5.18) отображены значения максимального усилия металла на оправку в I-проходе для профиля $\varnothing 42 \times 4$. Анализ результатов показывает, что для профиля $\varnothing 42 \times 4$ максимальное усилие составило – 23,560 кН.

Все расчёты выполнены для условий прокатки без применения смазки.



Рисунок 5.18 – Усилие металла на оправку в I-проходе

5.7.2 Усилие металла на оправку во II-проходе

На диаграмме (рис. 5.19) представлены значения усилия металла на оправку во II-проходе для профиля $\varnothing 42 \times 4$. Анализ данных показывает, что максимальное усилие металла на оправку во втором проходе составляет – 24,695 кН.

Все расчёты выполнены в условиях прокатки без использования смазки.

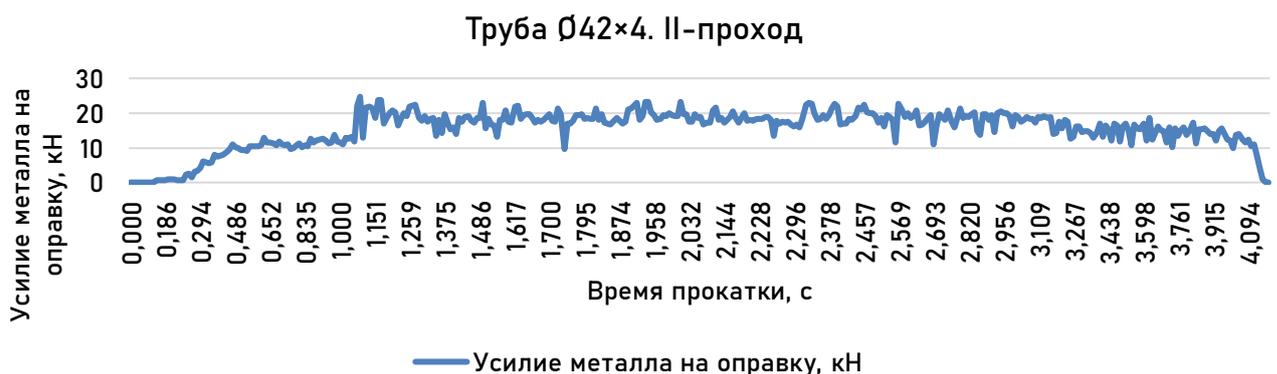


Рисунок 5.19 – Максимальное усилие металла на оправку во II-проходе

5.7.3 Усилие металла на валок в I-проходе

На приведенной диаграмме (рис. 5.20) показаны усилия металла на валок в первом проходе для профиля трубы $\text{Ø}42 \times 4$, выполненные без использования смазки. Усилия металла на валок измеряются в килоньютонах (кН).

Максимальное усилие металла на валок в первом проходе составило – 78,0 кН;



Рисунок 5.20 – Максимальное усилие металла на валок в I-проходе

5.7.4 Усилие металла на валок во II-проходе

На приведенной диаграмме (рис. 5.21) показаны усилия металла на валок во втором проходе для различных типов труб и профилей, выполненные без использования смазки. Усилия металла на валок измеряются в килоньютонах (кН).

Для профиля трубы $\text{Ø}42 \times 4$ максимальное усилие металла на валок составило 68,610 кН.

Сравнение усилий на валки между первым и вторым проходами показывает, что усилия металла на валок во втором проходе несколько ниже, что подтверждает определенную степень деформации металла и уменьшение нагрузки на оборудование по мере прохождения материала через стан.



Рисунок 5.21 – Максимальное усилие металла на валок во II-проходе

5.7.5 Геометрические параметры полученной трубы

Профиль Ø42×4 демонстрирует минимальное отклонение по диаметру и толщине стенки черновой трубы, равное 0,042 и -0,008 мм соответственно, что свидетельствует о высокой точности соблюдения диаметра и толщины стенки при прокатке.

Таблица 5.4 – Геометрические параметры полученной трубы

Профиль	Фактический диаметр, мм	Фактическая толщина стенки трубы, мм
Ø42×4	42,042	3,992

5.8 Экспериментальная прокатка на стане ДУО-210

Для дальнейшего анализа процесса продольной прокатки с использованием цилиндрической оправки были проведены эксперименты на трубопрокатном стане ДУО-210. Оборудование обладает следующими техническими характеристиками:

- диаметр оправки: 34 мм;
- усилие на оправку: 10–15 тонн;
- максимальное усилие на нажимной винт: 15 тонн;
- длина гильзы: 300 мм;
- внешний диаметр гильзы: 45 мм;
- внутренний диаметр гильзы: 35 мм;
- частота вращения валков: 10 об/мин;
- скорость прокатки: до 100 мм/сек.

На рисунке 5.22 представлено изображение трубопрокатного стана ДУО-210, который был использован для проведения экспериментальных исследований. Приведённые технические параметры свидетельствуют о высокой производительности оборудования, а также о его способности работать с заготовками различной геометрии в условиях значительных нагрузок.

Для проведения процесса пластической деформации в качестве заготовок использовались холоднокатаные трубы из стали Ст3 диаметром ø45 мм и длиной 200 мм.

Технологический процесс прокатки на стане ДУО-210 включает следующие этапы:

1. Нагрев заготовок.

Перед началом прокатки заготовки нагреваются в муфельной печи до температуры 1100°C.

2. Время нагрева.

Процесс нагрева занимает 7 минут в муфельной печи, используемой для разогрева заготовок до требуемой температуры, что обеспечивает их пластичность и улучшает условия для дальнейшей деформации.

Для проведения прокатки оправка также предварительно нагревается до температуры 100°C.

После нагрева, в зависимости от условий прокатки:

- при прокатке без смазки, оправка используется без нанесения каких-либо смазочных материалов.

На следующем этапе оправка размещается на столе установки УИТ, после чего на неё надевается подготовленная заготовка. Такой подход обеспечивает равномерное распределение температуры и минимизацию износа инструмента во время процесса прокатки.

После подготовки оправка с заготовкой устанавливается в захват, где происходит центровка по заранее выбранному калибру. Для обеспечения точности установки и надежности фиксации используются скоба на захвате и направляющий уголок. Такое расположение гарантирует правильное позиционирование заготовки в процессе прокатки, что способствует равномерности деформации и снижению риска образования дефектов.



Рисунок 5.22 – Клеть ДУО-210 с калиброванными валками

После установки оправки с заготовкой гильза подается на прокатку в заранее выбранный калибр, при этом гидроцилиндр остается выключенным. В момент, когда труба захватывается

валками, включается гидропривод, обеспечивающий прокатку с контролируемым перемещением оправки.

По завершении процесса пластической деформации трубы, оправка вместе с раскатанной заготовкой извлекаются из установки. На следующем этапе проводится анализ полученной заготовки с целью изучения качества поверхности, геометрических параметров и внутренней структуры трубы.

5.9 Проведение эксперимента

В ходе исследования была прокатана труба без применения смазки.

Исходные данные процесса прокатки:

- скорость движения штока цилиндра при прокатке: 30 мм/с;
- частота вращения валков: 10 об/мин.

Эти параметры определяют динамику пластической деформации заготовки и позволяют оценить эффективность процесса в условиях изменённого трения.

Геометрические параметры раскатанных труб приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 — Геометрические характеристики прокатанных образцов

Образец	Диаметр после прокатки, мм	Ширина лампаса, мм
Труба (без смазки)	42,76	43,46

Изображения прокатанных заготовок представлены на рисунках 5.23.



Рисунок 5.23 — Труба, прокатанная без смазки

5.10 Сравнительный анализ

В рамках проведенного исследования осуществлялась прокатка трубы без смазки, а также моделирование процесса в специализированной среде «QForm». Результаты сравнения представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 — Геометрические характеристики прокатанных образцов по результатам экспериментальной прокатки и моделирования в среде «QForm»

Образец	Диаметр трубы после прокатки, мм	Диаметр трубы после моделирования, мм	Отклонение, %
Труба (без смазки)	42,76	42,042	1,679

В результате опытной прокатки в реальных условиях стан ДУО-210 позволил получить трубу диаметром $\varnothing 42,76$ мм, что отличается от результата моделирования. Данное значение обусловлено реальными условиями трения, температуры и механической деформации.

В программной среде «QForm», при использовании заданных параметров процесса (скорость, частота вращения валков, усилия), прогнозируемый диаметр трубы составил $\varnothing 42,042$ мм. Этот результат демонстрирует точность модели в условиях контроля над основными переменными.

Разница между экспериментальным диаметром трубы и результатом моделирования составила 1,679%. Это отклонение находится в пределах допустимой погрешности для процессов пластической деформации. Данная погрешность объясняется рядом факторов, характерных для реального процесса: неоднородностью температуры, сложными условиями трения, вариативностью физических свойств материала заготовки и возможными вибрациями оборудования.

Среда «QForm» позволила учесть основные параметры процесса, включая усилия на валках, скорость деформации и распределение температуры. Однако модели не полностью учитывают ряд факторов, присутствующих в реальной установке (например, микроизменения геометрии оправки или валков).

Сравнение результатов опытной прокатки и моделирования в среде «QForm» показало их высокую степень согласованности. Незначительное отклонение в размере 1,679% подтверждает достоверность использования «QForm» для прогнозирования геометрических параметров готовой трубы и оптимизации процесса прокатки. Таким образом, среда QForm может быть рекомендована для дальнейшего применения в задачах математического моделирования процессов пластической деформации и разработки технологических решений.

Усилия на валок и оправку при разных условиях трения представлены в таблице 5.8.

Анализ результатов показал, что усилие на оправку и валок в эксперименте варьировалось в пределах 61–114 кН и 103–134 кН, а в моделировании составило 63,560 и 98,610 кН соответственно. Время прокатки в эксперименте составило 8,1 секунды, а в моделировании – 8,044 секунды. Различия между экспериментальными и расчетными данными минимальны, что подтверждает достоверность моделирования.

Таблица 5.7 — Усилия на валок и оправку при разных условиях трения по результатам экспериментальной прокатки

Процесс	Усилие металла на валок, кН	Усилие металла на оправку, кН	Время прокатки, сек
Без смазки	103-134	61-114	8,1

Таблица 5.8 — Усилия на валок и оправку при разных условиях трения по результатам моделирования в среде «QForm»

Процесс	Усилие металла на валок, кН	Усилие металла на оправку, кН	Время прокатки, сек
Без смазки	98,610	63,560	8,044

5.11 Выводы по главе

Сравнительный анализ данных прокатки на автоматическом стане с цилиндрическими и коническими короткими оправками предоставил следующие ключевые выводы:

1. Максимальное усилие металла на оправку (I проход):

В первом проходе прокатки усилия металла на конических оправках в большинстве случаев превышают усилия на цилиндрических длинных оправках. Максимальное усилие металла на оправку при использовании конических оправок достигло 465 кН (профиль Ø219×7), что на 132 кН больше, чем для цилиндрических оправок. Для профилей меньшего размера (Ø127×4,5) различия в усилиях между оправками незначительны, однако систематически усилия на конических оправках остаются выше. Это указывает на возможность более интенсивного воздействия металла на оправку при использовании конических инструментов.

2. Максимальное усилие металла на оправку (II проход):

Во втором проходе прокатки усилия на при применении наблюдается аналогичная тенденция. Усилие металла на оправку при применении конических оправок значительно выше, чем при применении цилиндрических оправок. Например, для профиля Ø219×7 разница составила 102 кН. Для меньших профилей (Ø127×4,5) разница минимальна, что свидетельствует о большей пригодности цилиндрических оправок для работы с мелкими профилями.

3. Отклонения по диаметру:

Конические короткие оправки продемонстрировали более выраженные отклонения по диаметру, как положительные, так и отрицательные. Наибольшее положительное отклонение наблюдалось на профиле $\text{Ø}168 \times 6$ для конических оправок и составило 2,05 мм, в то время как для цилиндрических оправок оно составило 0,98 мм. На профиле $\text{Ø}219 \times 7$ оба типа оправок показали одинаковое отрицательное отклонение в -2,05 мм, однако цилиндрические оправки продемонстрировали большую стабильность параметров в других профилях.

4. Отклонения по толщине стенки:

Конические короткие оправки характеризуются как положительными, так и отрицательными отклонениями по толщине стенки, в то время как цилиндрические оправки обеспечивают большую стабильность. Максимальное положительное отклонение по толщине стенки для конических оправок наблюдалось на профиле $\text{Ø}180 \times 6$ и составило 1,11 мм, что существенно выше аналогичного показателя для цилиндрических оправок. На профиле $\text{Ø}168 \times 6$ конические оправки продемонстрировали значительное отрицательное отклонение (-0,92 мм), что указывает на сложность обеспечения точности геометрии при их использовании.

5. Заключение:

Проведенный анализ показал, что конические короткие оправки обеспечивают более высокие усилия металла на оправку, что может быть полезно при необходимости получения плотных и прочных металлоизделий. Однако их использование сопровождается большими отклонениями по геометрическим параметрам прокатанных труб. Цилиндрические длинные оправки демонстрируют меньшие отклонения по диаметру и толщине стенки, обеспечивая более стабильные параметры прокатки, что делает их предпочтительными для операций, требующих высокой точности. Выбор типа оправки следует осуществлять с учетом требований к геометрическим характеристикам готового изделия и параметров процесса прокатки.

Выводы

1. Анализ технологического процесса производства горячекатаных бесшовных труб на ТПА-220 с автоматическим станом показал, что основными дефектами труб являются внутренние плены и концевые складки. Установлено, что одной из причин образования внутренних плен является несовершенная методика проектирования очага деформации прошивного стана ТПА-220. Дефект в виде концевых складок на трубах обусловлен формоизменением металла в неустановившейся стадии процесса раскатки.

2. На основе разработанного алгоритма была создана программа «Eisen v2.0» для расчета геометрических параметров очага деформации и настроечных параметров прошивного стана. Использование программы «Eisen v2.0» позволяет повысить точность расчетов параметров очага деформации прошивного стана: отклонение от фактических размеров, полученных на заторможенной заготовке, составило 1,42%, в то время как при расчете по программе «QForm» результаты отличались от фактических на 2,28%.

3. На основе полученных результатов была проведена реконструкция рабочей клетки прошивного стана с изменением конструкции барабанов для калибровки валков с удлиненной бочкой. Для скорректированных параметров очага деформации, рассчитанных с использованием программы «Eisen v2.0», была разработана таблица прокатки, реализация которой позволила увеличить выход годной продукции на 12,9% и снизить брак по внутренним пленам на 20,27%.

4. В ходе моделирования процесса прокатки на автоматическом стане ТПА-220 в среде «QForm» был установлен характер напряженно-деформированного состояния металла на стадии неустановившегося процесса прокатки и влияние этого состояния на формоизменение трубы. Это позволило выявить причины образования концевых складок, для устранения которых был разработан новый оправочный узел, обеспечивающий уменьшение вероятности образования дефектов в виде «плавников» и снижение брака на 50%. Также было установлено, что при использовании конической оправки усилие на оправку в среднем на 26,5% выше, чем при прокатке на цилиндрической оправке. Таким образом, коническая оправка оказывает значительное сопротивление перемещению трубы, что негативно сказывается на качестве внутренней поверхности трубы.

5. На стане ДУО-210 лаборатории МИСиС была проведена опытная прокатка, результаты которой подтвердили адекватность моделирования, на основании этого рекомендовано применение цилиндрической перемещаемой оправки при раскатке труб на автоматическом стане.

В результате выполнения диссертационной работы усовершенствована технология производства труб на ТПА с автоматическим станом, а именно, проведена корректировка настройки очага деформации при прошивке, основанная на результатах расчета по разработанному алгоритму, реализованному в программе «Eisen v2.0». Это позволило снизить брак по внутренним пленам на 20,27%. Путем анализа формоизменения трубы в неустановившейся стадии процесса раскатки, были выявлены причины образования концевых складок, что привело к разработке новой конструкции оправочного узла. В результате этого было снижено образование дефектов в виде «плавников» и уменьшен брак на 50%.

Список использованных источников

- 1 Обработка металлов давлением: учебник : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Металлургия" / Романцев Б. А., Гончарук А. В., Вавилкин Н. М., Самусев С. В.; Федеральное агентство по образованию, Гос. технологический ун-т "Московский ин-т стали и сплавов", Каф. технологии и оборудования трубного производства. — Москва: МИСиС, 2008. — 959 с.: ил.
- 2 Матвеев Ю. М., Ваткин Я.Д. Калибровка инструмента трубных станов. М.*-Металлургия, 1970,480 с.
- 3 Данченко В. Н., Коликов А. П., Романцев Б. А., Самусев С. В. Технология трубного производства / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, С. В. Самусев. — Москва: Интернет Инжиниринг, 2002. — 200 с.
- 4 Машиностроение. Т. IV-5: Машины и агрегаты металлургического производства / ред.-сост.: В. М. Синицкий, Н. В. Пасечник; отв. секретарь В. Г. Дрозд; отв. ред. тома В. М. Синицкий; ред. тома: А. И. Майоров [и др.]. — Москва: Наука, 2004. — 912 с. : ил., табл. — ISBN 5-217-03239-1.
- 5 Шербутаев Н. И. Модернизация выходной стороны прошивного стана ТПУ-220 с целью минимизации образования дефектов на внутренней поверхности труб: выпускная квалификационная работа магистра / Шербутаев Нодирбек Илхом угли. — Место защиты: НИТУ МИСиС, Москва, 2019.
- 6 Гетало В.И., Осренко В.Я., Гейко И. К. Экспериментальное определение работы прошивки в косовальковых станах. Metallurgiya i koksokhimiya. Вып. 28. Киев, 1972. с. 43–46.
- 7 ГОСТ 5632–72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные марки. 1987.
- 8 Разработка моделей дефектообразования и норм по микро и макроструктуре на трубную заготовку из нержавеющей и высоколегированных сталей для производства бесшовных трую. Отчет о НИР. Уральский НИИ трубной промышленности. Руководитель Р.А.Ковынев; № ГР 79022236. Челябинск, 1981 г.
- 9 K. Gruber, Ueber die Herstellung nahtloser Röhreunter besonderer Berücksichtigung des Mannesmann–Schrägwalz-verfahren, Stahl und Eisen, 1919, №№ 36-38, 40-42.
- 10 Ф. Кокс, Косая вальцовка, реферат. Трубное производства, сборник материалов ДМетИ, вып. I, 1932.
- 11 K. Gruber, Ueber Querwalzverfahreb zur Herstellung grosser nahtloser Röhre, Mitteteilungen, v. K – W. – Instisut für Eisenhüntten, В. XII, 1930.
- 12 П.Т. Емальяненко, Теория косо́й пилигримовой прокатки, Metallurgizdat, 1949.

- 13 И. А. Фомичев, Определение формы и размеров калибра в станах косо́й вальцовки, Теория и практика металлургии, 1937, № 9.
- 14 П. К. Тетерин, Геометрия косо́й прокатки. Прокатное и трубопрокатное производства, приложение к журналу «Сталь», 1958.
- 15 Шербутаев Н. И., Гончарук А. В., Исхаков Р.В., Старичкова О. В. Разработка универсальной математической модели для определения геометрических параметров очага деформации при прокатке труб на прошивных станах с бочковидными, чашевидными и грибовидными валками // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2022. Т. 78. № 2. С.150-159.
- 16 Данилов Ф. А., Глейберг А.З., Балакин В. Г. Горячая прокатка труб. – М.: Металлургия, 1962. – 501 с.
- 17 Швейкин В. В. Причины образования поперечных трещин на трубах при прокатке в круглом калибре на оправке. – Сталь, 1949, №3, с.340-350.
- 18 Остренко В. Я., Ватугин П. И. Производство труб на автоматических установках. – Харьков: Металлургиздат, 1958.–134с.
- 19 Усовершенствование калибровки валков автоматстанов / В.Я.Остренко, В.Г.Чус, И.И.Дродский и др. – М.: Металлургия, 1979.–20с. Экспрессинформация / Ин-т «Черметинформация», 1978, сер.8, вып. 2.
- 20 Чекмарев А. П., Друян В. М. Теория трубного производства. – М.: Металлургия, 1976. – 304 с.
- 21 Осадчий В. Я. Технология и оборудование трубного производства / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец, А. П. Коликов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
- 22 Шевакин Ю. Ф. Производство труб / Ю.Ф. Шевакин, А. П. Коликов, Ю. Н. Райков. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. –568 с.
- 23 Чекмарев А. П., Мутьев В. С., Машковцев Р. А. Калибровка прокатных валков. – М.: Металлургия, 1971. – 508 с. 8.
- 24 Э.Зибель. Основные соображения о процессе косо́й вальцовки. Сб. «Трубное производства».
- 25 Шербутаев Н.И., Гончарук А. В., Исхаков Р.В., Старичкова О. В. Минимизация дефекта в виде продольной складки на концевых участках тонкостенных гильз при прокатке на ТПА с автоматическим станом // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2022. Т. 78. № 1. С. 81–85.
- 26 И. А. Фомичев. Деформация металла в стане косо́й вальцовки. Сталь, 1936, №11.
- 27 И. А. Фомичев. Деформация металла в дисковом стане. Сталь, 1940, №11–12.

- 28 В. В. Швейкин. Причины образования внутренних плен при изготовлении труб из легированных сталей. Уральская металлургия, 1938, № 3.
- 29 В. С. Смирнов. Поперечная прокатка. Машгиз, 1948.
- 30 И. В. Дубровский, Л. И. Матлахов. Расположение оправки и образование плен на трубах. Сталь, 1947, №7.
- 31 А. Ф. Лисочкин. Поперечная прокатка. Сталь, 1946, № 6.
- 32 Потапов, И.Н. Новая технология винтовой прокатки / И. Н. Потапов, П.И. Полухин. – М: Металлургия, 1975. – 343 с.
- 33 Потапов, И.Н. Технология винтовой прокатки / И. Н. Потапов, П.И. Полухин. – М: Металлургия, 1990. – 344 с.
- 34 Тетерин П. К., Теория поперечно-винтовой прокатки: учеб. для вузов / П. К. Тетерин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
- 35 ГОСТ 20072–74. Сталь жаропрочная низколегированная. Технические условия. 1976.
- 36 Данилов, Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб / Ф. А. Данилов, А.З. Глейберг, В. Г. Балакин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1972. – 591 с.3
- 37 Король, А. В. Компьютерное моделирование процесса прошивки в стане винтовой прокатки с бочковидными валками / А. В. Король, А. В. Выдрин, В. В. Широков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 68-74.
- 38 ТУ 14-1-2694-79. Заготовка трубная из коррозионностойкой стали марок 06X16H15M3B-ИД (типа ЭИ847-ИД) и 06X16H15M3B-ИШ (типа ЭИ847-ИШ). Технические условия. 1979.
- 39 ГОСТ 4727–83. Проволока подшипниковая. Технические условия. 1984.
- 40 Красиков А. В. Теоретические основы новой технологии прокатки товарных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали на агрегатах с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой: диссертация ... доктора технических наук: 2.6.4. / Красиков Андрей Владимирович; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»]; Диссовет 24.2.437.01 (Д 212.298.01)]. – Челябинск, 2023. – 383 с. : ил.
- 41 ГОСТ 5432–72. Трубы стальные бесшовные. Технические условия. М.: Государственный стандарт Советского Союза, 1972.
- 42 Миронов Ю. М. Геометрические параметры процесса кривой прокатки / Ю. М. Миронов // Производство труб: сб. науч. тр. УкрНИТИ. – Харьков: Металлургиздат, 1962. – Вып. 6 – С. 37–46.
- 43 Фомичев И. А. Косая прокатка / И. А. Фомичев. – Харьков: Металлургиздат, 1963. – 262 с.

44 Меркулов, Д.В. Особенности прошивки заготовок в косовалковых станах разного конструктивного исполнения/ Д. В. Меркулов, Р.М. Голубчик, М.В. Чепурин // Труды IV Международного конгресса прокатчиков: в 2 т. – М: АО «Чермет- информация». – 2002. – Т. 2. – С. 82–87.

45 Швейкин, В.В. Улучшение технологии прокатки труб из слитков / В. В. Швейкин, Л. Н. Карпенко // Сталь – 1957 ш. – №4 – С.340–37.

46 Мастюнина О.Н., Муриков М.А., Ибрагимов В. Э., Коровин В. С., Шашков А.Н., Томило В.А. Валок прошивного стана. ВУ 8698 U 2012.10.30.

47 Шербутаев Н. И., Гончарук А. В., Исхаков Р. В., Старичкова О. В. Разработка компьютерной программы для расчета геометрических параметров очага деформации и настроечных параметров прошивного стана в процессе производства горячекатаных бесшовных труб // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79. № 8. С. 669–675.

48 ГОСТ 4543–71. Трубы стальные электросварные. Технические условия. М.: Государственный стандарт Советского Союза, 1971.

49 ГОСТ 26645. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку.

50 Шербутаев Н. И., Гончарук А. В., Исхаков Р. В., Старичкова О. В. Исследование образования дефектов в виде продольных складок на концах черновых труб при прокатке на автоматическом стане ТПА // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79. № 9. С. 755–760.

51 ГОСТ 5950–73. Прутки и полосы из инструментальной легированной стали.

52 ГОСТ 8732–78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные.

53 ГОСТ 8731–74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные.

54 Правосудович, В. В. и др. Дефекты стальных слитков и проката: справочник. – Москва: Интермет Инжиниринг, 2006. – 382 с.: ил., табл.; 24 см. – (Справочник). – ISBN 5-89594-133-8.

55 ГОСТ 7798–70. Трубы стальные бесшовные для конструктивных и технологических целей. Технические условия. М.: Государственный стандарт Советского Союза, 1970.

56 ГОСТ 5915–70. Трубы стальные водогазопроводные. Технические условия. М.: Государственный стандарт Советского Союза, 1970.

57 ГОСТ 8752–79. Трубы стальные бесшовные. Методы испытаний. М.: Государственный стандарт Советского Союза, 1979.

58 ГОСТ 520–2002. Трубы стальные и трубы из легированных сталей. Общие технические условия. М.: Государственный стандарт Российской Федерации, 2002.

59 ГОСТ 2590–2006. Трубы стальные бесшовные для трубопроводов. Технические условия. М.: Государственный стандарт Российской Федерации, 2006.

60 ГОСТ 6402–70. Трубы стальные электросварные для трубопроводов. Технические условия. М.: Государственный стандарт Советского Союза, 1970.

61 ГОСТ 977–88. Трубы стальные горячекатаные и холоднокатаные для общего применения. Технические условия. М.: Государственный стандарт Советского Союза, 1988.

62 ГОСТ 1050–2013. Сталь углеродистая обрабатываемая давлением. Технические условия. М.: Государственный стандарт Российской Федерации, 2013.

63 Машиностроение. Т. IV-5: Машины и агрегаты металлургического производства / ред.-сост.: В. М. Сеницкий, Н. В. Пасечник; отв. секретарь В. Г. Дрозд; отв. ред. тома В. М. Сеницкий; ред. тома: А. И. Майоров [и др.]. — 2004 (ППП Тип. Наука). — 912 с.: ил., табл. — ISBN 5-217-03239-1.

64 Вердеревский В. А., Глейберг А.З., Линденбаус В.И. – Черная металлургия. БюлНТИ, 1980, №7, 3–10.

65 Гуляев Г. И., Нечипоренко А. И., Анзорег Э. и др. – «Сталь», 1977, №11, с. 1031–1033

66 Обработка металлов давлением : учебник : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению Металлургия / [Романцев Б. А., Гончарук А. В., Вавилкин Н. М., Самусев С. В.] ; Федеральное агентство по образованию, Гос. технологический ун-т Московский ин-т стали и сплавов, Каф. технологии и оборудования трубного производства. - Москва: МИСиС, 2008 (М.). - 959 с. : ил.; 21 см.

67 ГОСТ 27847–88. Трубы стальные бесшовные. Дефект поверхности. Термины и определения. М.: Государственный стандарт Российской Федерации, 1988.

68 Машины и агрегаты для производства и отделки проката. Учебник для вузов/ Целиков А. И., Полухин П. И., Гребенник В. М. и др. 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Металлургия, 1988. 680 с. 4.

69 Выдрин, А.В. Определение настроечных параметров процесса прошивки на двухвалковых станах винтовой прокатки / А. В. Выдрин, А.В. Король // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 74–80.2. Определение геометрических параметров очага деформации в станах поперечно-винтовой прокатки / Ю. Г. Гуляев, Е. И. Шифрин, И.И. Лубе и др. // Сталь. – 2013. – № 11 – С. 53–55.

70 Прошивка в косовалковых станах [Текст] / А. П. Чекмарев, Я. Л. Ваткин, М. И. Ханин и др. - [Москва]: Металлургия, 1967. - 240 с.: ил.; 22 см.

71 Трубное производство: учеб. / Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, Т77 Н.М. Вавилкин, С. В. Самусев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 970 с.

72 Король, А. В. Совершенствование двухвалковой винтовой прошивки на основе моделирования и разработки новых технических решений: диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.05 / Король Алексей Валентинович; [Место защиты: Юж.-Ур. гос. ун-т]. - Челябинск, 2016. - 139 с. : ил.

73 Разработка математической модели образования дефектов в виде складок на концевых участках тонкостенных труб при прокатке на автоматическом стане ТПА 220 и мер по их устранению [Текст]: 6-8 / Министерство науки и высшего образования РФ ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет имени первого Президента РФ Б.Ю. Ельцина». Институт новых материалов и технологий. Кафедра металлургических и роторных машин; рук. Чечулин Ю. Б.; ответст.: Федулов А. А.; исполн.: Булганина М. Ю. – Е., 2020. – 49 с.

74 Dr.Krahn. Прошивка на косовалковом стане – основы и технология. Руководство по обучению. – SMS MEER, 2007. – 47 с.

75 Технология прокатного производства. В 2 – х книгах. Кн. 1. Справочник: Беняковский М. А., Богоявленский К.Н., Виткин А. И. и др. М. Металлургия, 1991 г., 440 с. 2.

76 Технология прокатного производства. В 2 – х книгах. Кн. 2. Справочник: Беняковский М. А., Богоявленский К.Н., Виткин А. И. и др. М. Металлургия, 1991 г., 423 с. 3 Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 – х томах. Т. 3.

77 Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. Королев А. А. Изл-во «Металлургия», 1969, 464 с. 5.

78 Машиностроение. Энциклопедия в 40 томах. Том IV-5 Машины и агрегаты металлургического производства. – М.: Машиностроение, 2004–912 с. 6

79 Прокатное производство. П.И. Полухин, И. М. Федосов, А. А. Королев, Ю. М. Матвеев. – 3 – е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1982. – 696 с. 7

80 Давильбеков Н.Х. Оборудование прокатных цехов (Учебник). – Алматы: КазНТУ, 2002. – 243 с.

81 Шербутаев Н. И., Гончарук А. В., Исхаков Р. В., Калнин И. В. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Способ продольной прокатки труб на автоматическом трубопрокатном стане. Патент № RU2023663368 РФ, СПК В21В 17/02; Заявл. 03.05.2024; Оpubл. 22.07.2024, Бюл. №21.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Классификатор дефектов

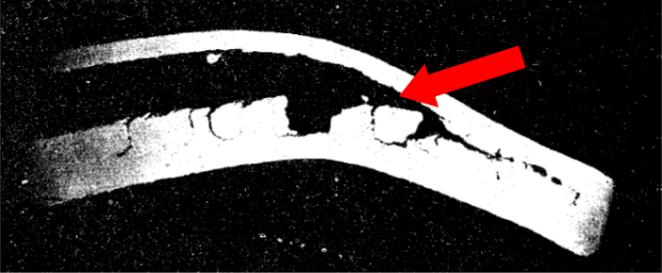
Рисунок А. 1 – Классификатор дефектов

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
<p>Сталеплавильная плена</p>	<p>Сталеплавильная плена – дефект поверхности продольной ориентации, представляющий собой отслоение металла, соединенное с изделием одной стороной, образовавшееся вследствие раскатки дефектов слитка или дефектов катанной заготовки сталеплавильного происхождения. Имеет расположение по винтовой линии, шаг которой может до нескольких метров или от 50÷100 мм с групповым или единичным расположением. Глубина дефектов может быть до нескольких миллиметров [54].</p>	 <p align="center">Плены по причине раскатывания подкорковых газовых пузырей слитка</p>	<p>Образуется вследствие раскатывания поверхностных и подкорковых газовых пузырей слитка от загрязнений слитка или литой заготовки (шлаками или огнеупорами) в процессе раскатывания [54].</p>
		 <p align="center">Плены по причине раскатанной поперечной трещины слитка</p>	
		 <p align="center">Плены при раскатывании загрязненности сердцевинки слитка на внутренней поверхности</p>	

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
Прокатная плена	Прокатная плена – дефект продольной ориентации, представляющий собой отслоение, соединенное с основным металлом одной стороной [54].	 <p data-bbox="1368 611 1991 642">Плена на нержавеющей заготовке. ТПА 140 №1</p>	Вследствие раскатывания в трубе дефекта поверхности трубной заготовки прокатного или ковочного происхождения
		 <p data-bbox="1353 989 2012 1020">Локальная плена от раскатывания дефектов слитка</p>	Образуются вследствие раскатывания дефектов различного происхождения на поверхности трубной заготовки (неполная зачистка дефектов, закаты, морщины и т.д.).
Раскатанное загрязнение	Раскатанное загрязнение – дефект поверхности, представляющий собой раскатанные разрывы и трещины продольной ориентации [54].		Образуется из-за наличия и раскатывания глубоких эндогенных и экзогенных неметаллических включений в металле [54]. Раскатанное загрязнение на поверхности трубы образуется вытягиванием в процессе прокатки загрязнения слитка или литой заготовки.

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
<p>Расслоение – дефект</p>	<p>Расслоение – дефект, видный на торце трубы или выходящий на внутреннюю поверхность, представляющий собой нарушение сплошности металла [54].</p>	 <p>Расслоение металла по толщине стенки</p>	<p>Образуется из-за несвариваемости металла при наличии в нем грубой рыхлости, шлаковых включений, внутренних разрывов, пережога [54]. На рисунке представлено расслоение металла в процессе прокатки по границам неметаллических включений, пережогу и т.п.</p>
		 <p>Расслоение по пережогу по толщине стенки</p>	<p>На рисунке представлено расслоение металла при прокатке по границам пережога (оплавленный и окисленный участок поверхности, вследствие несоблюдения условий изготовления трубной заготовки).</p>
		 <p>Вид расслоения, выходящего на внутреннюю поверхность</p>	<p>На рисунке представлен вид расслоения металла в процессе прокатки по границам неметаллических включений, пережогу и т.п.</p>

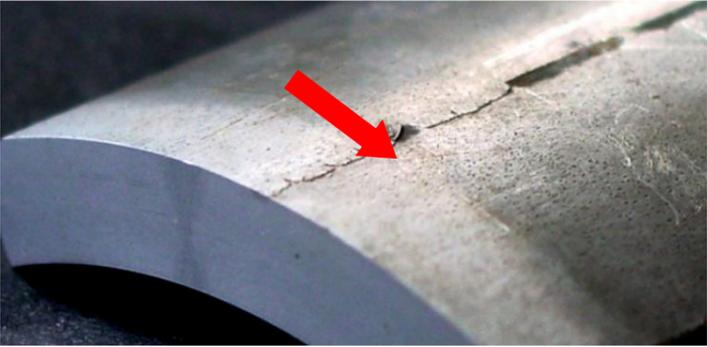
Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
<p>Раскатанные металлические частицы</p>	<p>Раскатанные металлические частицы – дефект поверхности, представляющий собой раскатанные частицы металла на трубах различной величины и формы.</p>	 <p data-bbox="1478 743 1970 774">Вкатанная частица металла от гильзы</p>	<p>Появляются в результате попадания в слиток частиц другого металла или отрыва от труб и гильз частиц металла.</p> <p>На рисунке представлен дефект «Вкатанная частица», которая образуется в результате раскатывания частиц металла на поверхности трубы, в следствие отрыва их в процессе прокатки от труб и гильз.</p>
		 <p data-bbox="1347 1255 2021 1287">Раскатанная частица металла на поверхности трубы</p>	<p>На рисунке представлен вид дефекта «Раскатанная частица» которая, образуется в результате раскатывания частиц металла на поверхности трубы, в следствие отрыва их в процессе прокатки от труб и гильз.</p>

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
Трубопрокатная плена	Трубопрокатная плена – дефект поверхности, представляющий собой отслоение металла поперечной ориентации, соединенное с основным металлом одной стороной. Глубина дефектов могут быть в пределах миллиметра, протяженность плен варьируется от 50 до 200 мм [5].	 <p data-bbox="1501 632 1863 663">Концевая внутренняя плена</p>	Концевая внутренняя плена образуется при нестационарном процессе прошивки трубной заготовки в прошивном стане [5].
		 <p data-bbox="1561 1129 1804 1161">Внутренняя плена</p>	Внутренняя плена образуется в результате нарушения режимов нагрева заготовки в печах или настройки прошивного стана.
		 <p data-bbox="1406 1535 1958 1566">Плена наружная (после обточки на 0,5 мм)</p>	Плена наружная образуется вследствие раскатки отпечатков от прокатного инструмента, задигов и неудовлетворительной настройки станом.

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
Чешуйчатость	Чешуйчатость – дефект поверхности, представляющий собой множественные отслоения чаще всего языкообразной формы и поперечной ориентации. Дефект располагается по всему периметру или его части на значительной длине трубы [54].		Чешуйчатость на внутренней поверхности образуется из-за снижения пластичности металла, вызванное повышенными температурами нагрева и повышенным содержанием легкоплавких элементов, а причиной образования чешуйчатости на наружной поверхности является раскатывание надрывов по пережогу металла заготовки.
Закат	Закат – дефект продольной ориентации одной или двумя полосами, плотно прилегающий к поверхности, с нарушением сплошности металла в направлении прокатки с одной или двух диаметрально противоположных сторон. Имеет одинаковую глубину по длине в поперечном сечении. Может быть прямолинейным или дугообразным Закат прямолинейный от реборд валков автоматического или редуционного стана образуется в следствие неправильной настройки клетей, а также смещение валков редуционного или калибровочного стана [54].	 <p data-bbox="1537 1205 1828 1241">Закат прямолинейный</p>	Закат прямолинейный образуется в результате закатывания уса, глубокой риски, задира, полученных от калибров автоматического стана или роликов обратной подачи [54].

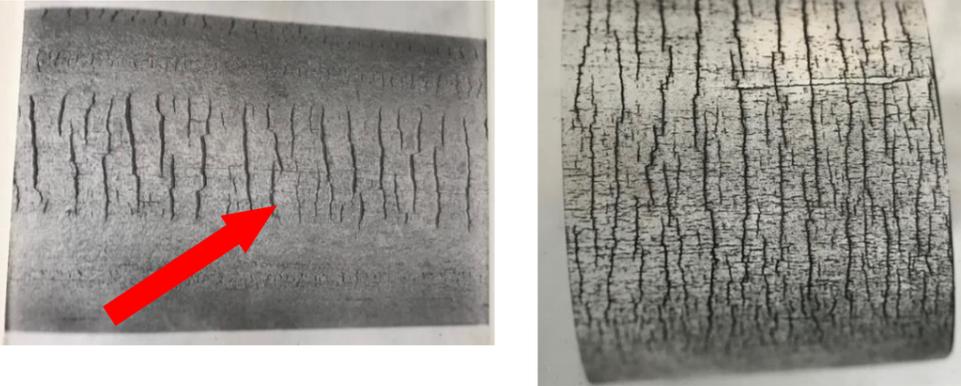
Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
<p>Подрез</p>	<p>Подрез – дефект поверхности, представляющий собой тонкое отслоение металла, одним концом соединенное с ним. Расположен по винтовой линии с шагом, который соответствует подаче трубы за один оборот ее в валках прошивного стана, умноженной на величину вытяжки при раскатке. Может иметь как одиночное, так и групповое строение [5].</p>	 <p>Подрез от линеек или проводок прошивного стана</p>	<p>Причины возникновения</p> <p>Подрез на поверхности трубы от линеек или проводка прошивного стана образуется из-за неудовлетворительного состояния поверхности инструмента (линейки, проводки) прошивного стана (износ линеек прошивного стана) [5].</p>
		 <p>Подрез после прошивного или обкатного стана</p>	<p>Подрез на поверхности трубы после прошивного или обкатного стана образуется из-за не удовлетворительного состояния инструмента выходной стороны прошивного или обкатного стана [5].</p>
		 <p>Подрез от валков правильной машины</p>	<p>Подрез от валков правильной машины образуется вследствие неправильной настройки или износ правильных валков.</p>

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
Трещины от напряжения	Трещины от напряжения – дефект поверхности продольной ориентации. Представляющий собой нарушение сплошности металла в виде узкого разрыва, идущего обычно вглубь, под прямым углом к поверхности [3].	 <p data-bbox="1397 688 1964 730">Трещина трубопрокатного происхождения</p>	Причинами возникновения могут являться: редуцирование остывших или недогретых горячекатанных труб, чрезмерные усилия при деформации в процессе прокатки или правки их, правка труб с наличием значительных остаточных структурных напряжений в металле, не снятых термообработкой [3].
		 <p data-bbox="1397 1098 1964 1140">Внутренняя риска</p>	Внутренняя риска образовывается вследствие царапания поверхности труб (гильз) налипшим на инструмент металлом.
		 <p data-bbox="1397 1566 1964 1608">Продольная риска</p>	Внутренняя риска образовывается из-а неудовлетворительного состояния рабочего инструмента оправок автоматического стана.

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
Механическое повреждение от оправки прошивного стана	Механическое повреждение от оправки прошивного стана – дефект представляет собой порез на внутренней поверхности трубы разной глубины и в форме раковины или повреждения поверхности длиной до 100 мм [5].	 <p data-bbox="1448 653 1917 682">Порез от оправки прошивного стана</p>	Основной причиной образования дефекта является наваривание частиц металла на поверхность оправок прошивного стана и биение оправки в очаге деформации и не соответствующее качество поверхности [5].
Морщина	Морщина – дефект поверхности, представляющий собой хаотически чередующиеся продольные углубления и выступы группового расположения. Протяженность дефектов бывает от нескольких десятков миллиметров до 50÷100 мм [54].	 <p data-bbox="1457 1050 1905 1075">Морщины на поверхности металла</p>	Причинами возникновения могут являться: повышенные обжатия при редуцировании или калибровании, переполнение калибров металлом, неправильная настройка стана.
Рванина	Рванина – дефект поверхности, представляющий собой нарушение сплошности металла с неровными стенками в виде разрывов различной ориентации. Данный дефект может быть сквозным [54].	 <p data-bbox="1626 1509 1739 1535">Рванина</p>	Основной причиной появления такого вида дефекта это понижение пластичности металла, в следствие нарушения режима термической обработки и нагрева.

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
Скворечник	Скворечник – дефект представляет собой либо поперечные, либо косые и углообразные разрывы металла, повторяющиеся по длине раската через кратные промежутки.	 <p data-bbox="1528 709 1834 741">Скворечник (сквозной)</p>	Скворечник на поверхности трубы появляется из-за повышенных неравномерных растягивающих напряжений при деформации металла, неправильной настройки стана редуционного или автоматического и чрезмерных деформаций в вершине калибра.
		 <p data-bbox="1513 1140 1849 1171">Скворечник прикатанный</p>	
Ужим	Ужим – дефект поверхности, представляющий собой перегиб стенки продольной ориентации различной протяженности и глубины. Могут развиваться и в сквозные трещины [54].	 <p data-bbox="1558 1577 1804 1608">Ужим на ТПА 140</p>	<p>Причины возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - потеря устойчивости поперечного сечения труб в процессе прокатки в автоматическом стане, редуцировании или калибровании [54]; - неправильный выбор частной деформации в первых клетях стана.

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
УС	Ус – дефект поверхности, представляющий собой прямолинейный выступ, расположенный с одной или двух диаметрально противоположных сторон по всей длине трубы или на ее части. В углах уса часто образуются трещины [54].	 <p data-bbox="1495 674 1872 705">УС с автомат стана ТПА-140</p>	Причины возникновения: неудовлетворительная настройка станов продольной прокатки, переполнение калибров калибровочного или редукционного стана, износ рабочего инструмента.
Рябизна	Рябизна – дефект поверхности, представляющий собой значительные неровности различной формы, располагающиеся группами по всей поверхности изделия или на его части [54].	 <p data-bbox="1472 1115 1890 1146">Рябизна от вкатывания окалины</p>	Основной причиной появления дефекта является вдавливание толстого слоя окалины при прокатке и правке, повышенный износ инструмента и множественное прилипание металла на валки.
		 <p data-bbox="1412 1472 1949 1503">Рябизна от низкой пластичности металла</p>	Рябизна образовывается также из-за низкой пластичности металла трубной заготовки низколегированных и коррозионностойких марок сталей.

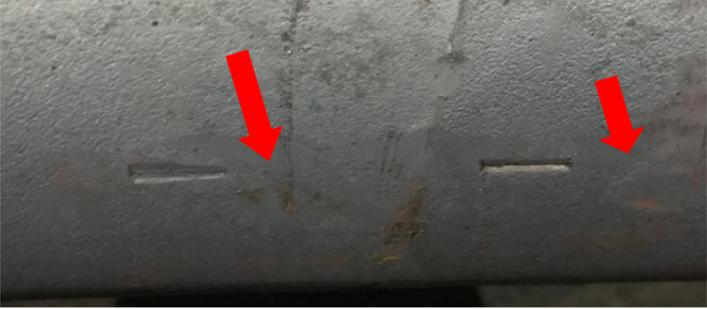
Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
Продав	Продав – дефект представляющий собой вмятину или сквозное отверстие с утоненными краями, вытянутое в направлении деформации. Может периодически повторяться по всей длине трубы.	 <p data-bbox="1448 919 1911 951">Продав вид наружной поверхности</p>	Причиной образования является попадание инородного тела между деформируемой трубой и рабочим инструментом.
Вкатанная окалина	Вкатанная окалина – дефект поверхности, представляющий собой вкрапления высокотемпературных окислов металла, вдавленных при горячей прокатке [54].	 <p data-bbox="1555 1356 1807 1388">Вкатанная окалина</p>	Вкатанная окалина на поверхности горячекатаной трубы появляется из-за неисправность систем сбива окалины с гильзы и черновой трубы, перегрев металла в методической или подогревательной печи.
Отпечатки	Отпечатка – дефект поверхности, представляющий собой углубления и выступы на изделии, повторяющиеся через равные промежутки, которые могут располагаться по всей поверхности и имеют форму дефекта на инструменте [54].		<p>Причины возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - налипание металла на поверхность линеек и валков; - износ рабочего инструмента.

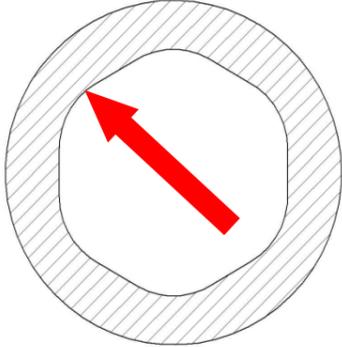
Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
<p>Раковина-вдав</p>	<p>Раковина-вдав – дефект поверхности, представляющий собой локальное углубление без нарушения сплошности металла трубы с пологим дном [54].</p>	 <p data-bbox="1397 705 1961 741">Раковина вдав на внутренней поверхности</p>	<p>Основной причиной появления такого вида дефекта является выпадение локальных плен, экзогенных неметаллических включений.</p>
		 <p data-bbox="1397 1121 1961 1157">Раковина вдав на наружной поверхности</p>	
		 <p data-bbox="1397 1528 1961 1564">Раковина внутренняя (ТПА 220)</p>	

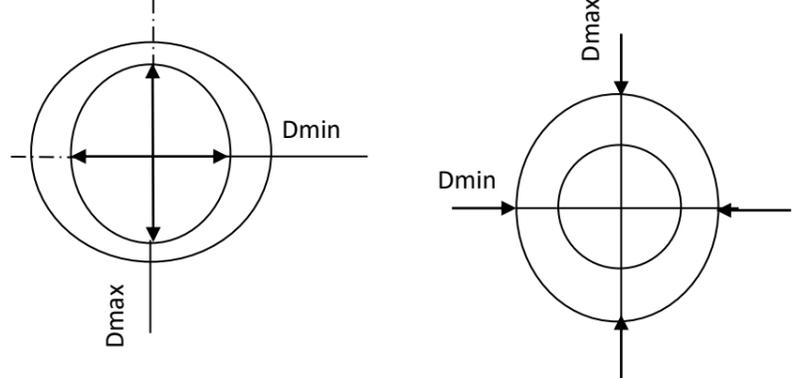
Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
<p>Порезы с прошивного стана</p>	<p>Порезы с прошивного стана – данный дефект представляет собой порезы на поверхности металла, проходящие с некотором шагом, равным шагу винтовой линии заготовки [5].</p>	 <p>Следы порезов с прошивного стана</p>	<p>Порезы на поверхности труб после прошивного стана появляются из-за износа и налипания на рабочие валки прошивного стана и износа или дефекта на поверхности линеек прошивного стана.</p>
<p>Механические повреждения с прокатки или отделки</p>	<p>Механические повреждения с прокатки или отделки – данный дефекты представляют собой углубления, порезы и прочие повреждения механического характера, полученные при транспортировке труб на промежуточных операциях производства в цехе.</p>	 <p>Забойны от упоров или цепей охладительных столов</p>  <p>Прирезка от валков автоматического стана или роликов обратной подачи</p>  <p>Порезы от люнетов ТОС</p>	<p>Причины возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неудовлетворительная настройка транспортирующих рольгангов и прочих трнасопртирующих устройств; - неудовлетворительная настройка роликов обратной подачи, валков автоматического стана или выработка калибров.

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
Кривизна	Кривизна – дефект, представляющий собой дугообразное отклонение оси трубы от прямой линии по всей длине или на отдельном ее участке. Кривизна трубы определяется максимальной величиной стрелы прогиба на определенном мерном участке или на всей длине в зависимости от требований нормативной документации [54].	 <p data-bbox="1516 720 1843 747">Труба кривая с прокатки</p>	<p>Причины возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неудовлетворительная настройка редуциционного или калибровочного стана [54]; - неравномерное охлаждение или нагрев трубы после прокатки.
Граненость	Граненость – дефект нарушения круглой формы внутреннего конура трубы с образованием шестигранного профиля.	 <p data-bbox="1445 1104 1911 1136">Граненость с редуциционного стана</p>	<p>Причины возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - нарушение деформационно-скоростного режима обжатий при редуцировании или калибровании; - выработка калибра валков; - не соблюдение соотношения диаметра к стенке для толстостенных труб.
Разностенность	Разностенность – дефект представляет собой отклонения толщины стенки трубы от номинального значения, регламентированного нормативной документацией. При повышенной разностенности минимальные и максимальные значения толщины стенки на любом участке по длине и периметру трубы превышают минимальные и максимальные допуски [54].	 <p data-bbox="1614 1822 1748 1856">Разностен</p>	<p>Причины возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - искаженный профиль заготовки в результате глубокого ремонта - одностороннего или по диаметрально противоположным сторонам, а также искаженный профиль заготовки до неопределенной, треугольной или квадратной формы; - нарушение технологических параметров прокатки труб; -неравномерный нагрев заготовки перед прокаткой; -повышенный износ инструмента; -особенности отдельных технологических операций [54].

Продолжение таблицы А.1

Название	Описание	Фотография	Причины возникновения
Овальность	<p>Овальность – дефект представляющий собой максимальный и минимальный диаметр по наружной или внутренней поверхности, чаще всего находящиеся в перпендикулярных направлениях, выходящие за максимально или минимально допустимые значение по необходимым требованиям.</p>	 <p>Овальность по внутреннему и наружному диаметру</p>	<p>Причины возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - неудовлетворительная настройка редуционного (калибровочного) стана или износ валков; - неравномерный нагрев или остывание труб по сечению и длине; - продольная разностенность; - неправильная настройка правильной машины; - износ валков правильной машины.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Блок-схема алгоритма расчёта геометрических параметров очага деформации при прошивке на винтовых станах прокатки

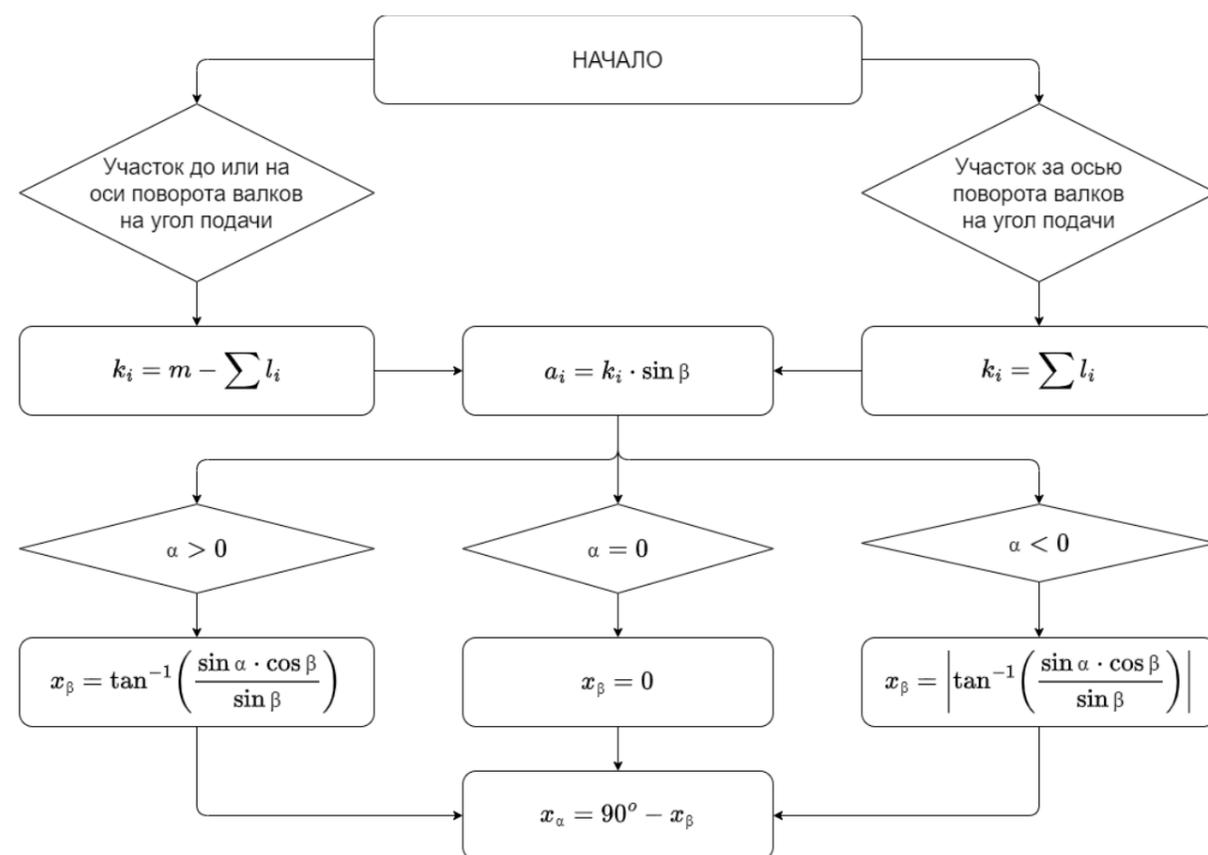


Рисунок В.1 – Блок-схема алгоритма расчёта геометрических параметров очага деформации при прошивке на винтовых станах прокатки. Часть №1

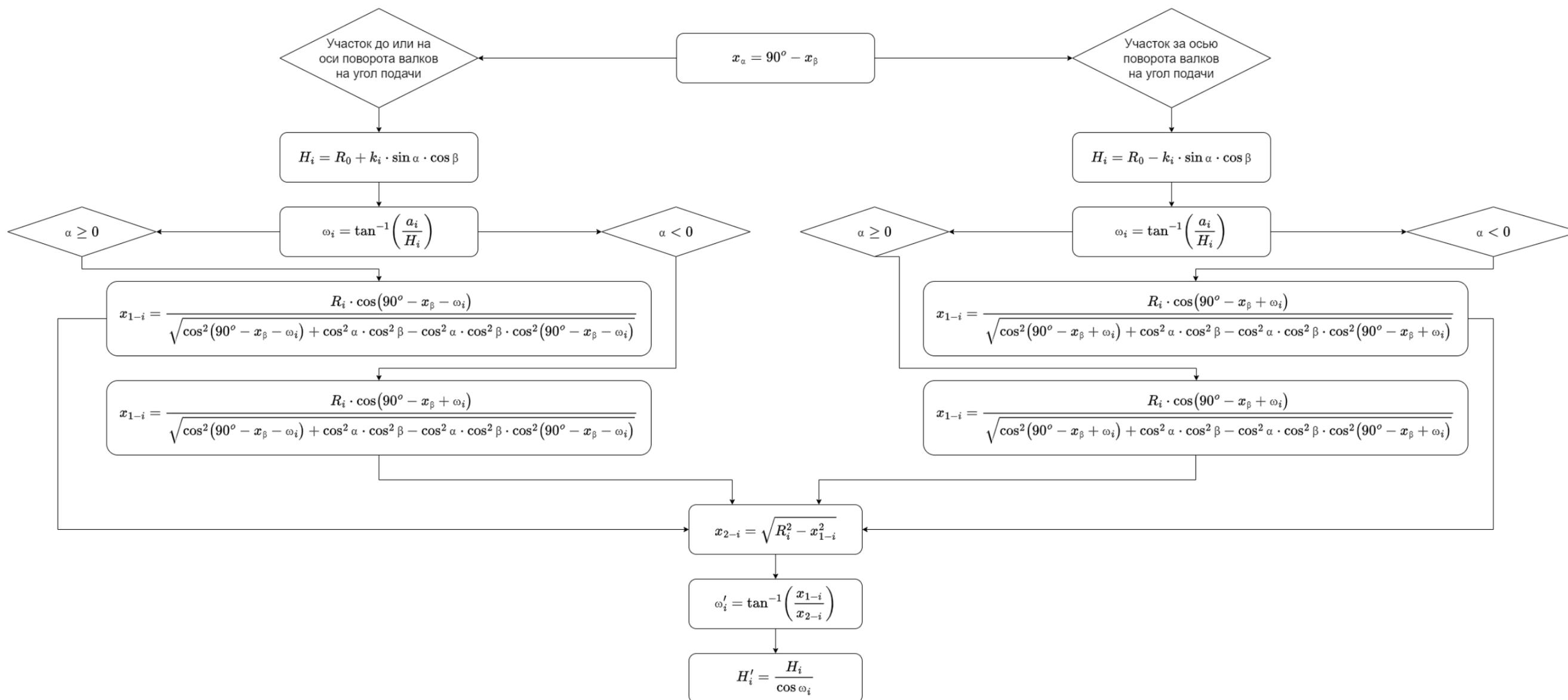


Рисунок В.2 – Блок-схема алгоритма расчёта геометрических параметров очага деформации при прошивке на винтовых станах прокатки. Часть №2

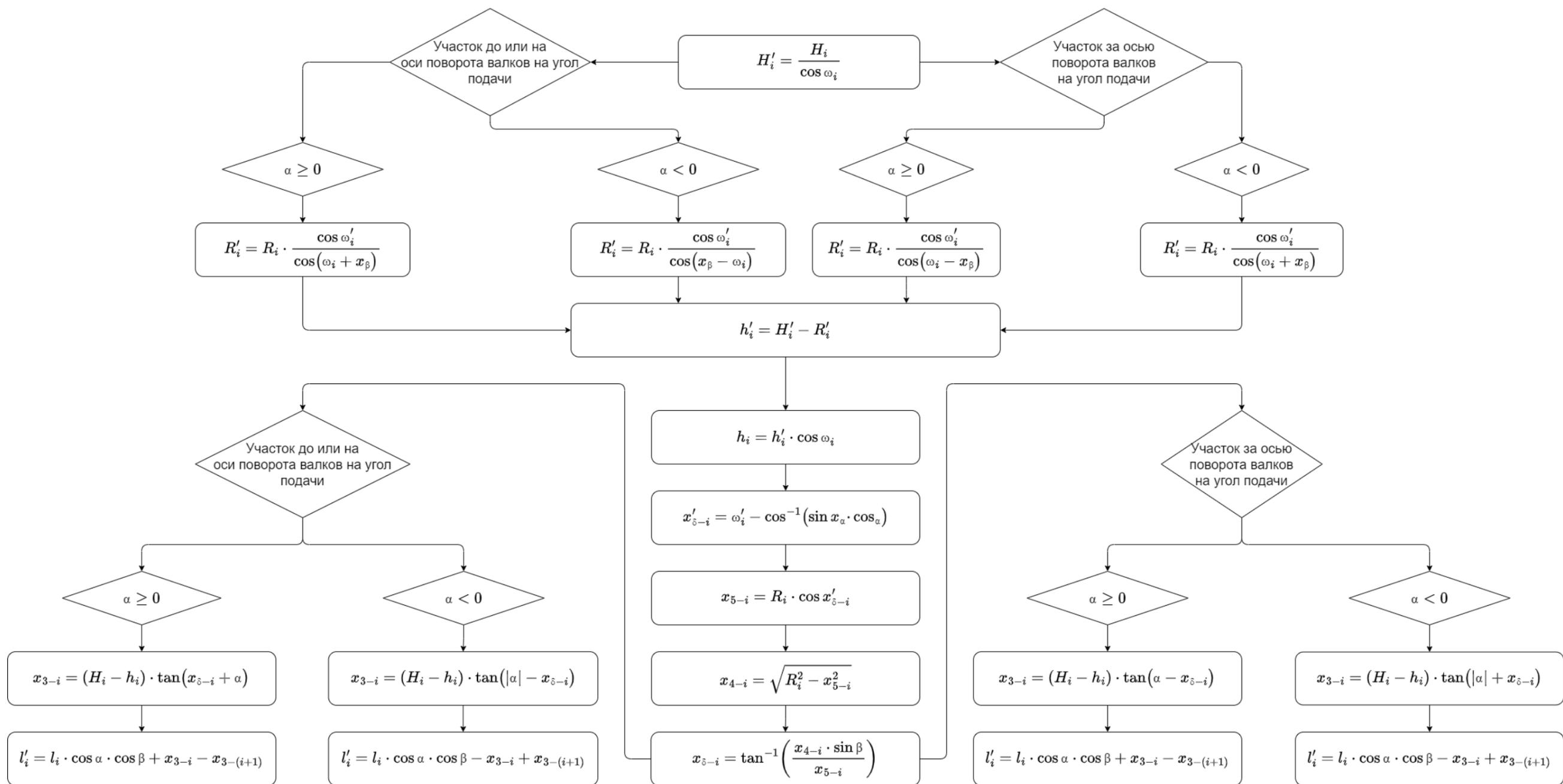


Рисунок В.3 – Блок-схема алгоритма расчёта геометрических параметров очага деформации при прошивке на винтовых станах прокатки. Часть №3

ПРИЛОЖЕНИЕ С

Интерфейс программы «Eisen v2.0»

The screenshot displays the 'Eisen v2.0' software interface, specifically the 'Настройка параметров стана' (Station Settings) tab. The interface is divided into three main sections:

- Left Panel (Parameters):** Contains various adjustable parameters for the rolling process, including:
 - Station Settings:** R_0 (569.5 mm), B (129.6 mm), L (143 mm), C (0 mm), $\beta_{разв}$ (11.0°), $\alpha_{раск}$ (0.0°), $К_{коэф.овал}$ (1.1).
 - Rolling Parameters:** $D_з$ (150 mm), $L_з$ (2 m).
 - Roller Parameters:** D_r (165.9 mm), S_r (9.1 mm), L_r (8.76 m), $D_о$ (129.6 mm), $К_{коэф.выт}$ (4.38), $Разбой$ (3.7 mm).
 - Relative Expansion:** $U_о$ (13.63%), $U_п$ (13.63%).
 - Primary Catch Condition:** n (80 rpm), $К_{коэф.трэн}$ (0.33).
 - Secondary Catch Condition:** GL (129.14 mm), GF (1.41).
- Center Panel (Diagram):** Titled 'Схема очага деформации' (Deformation Zone Scheme), it shows a cross-section of the roller and the deformed metal. Key dimensions and labels include:
 - $D_з=150$ (roll diameter), $GL=129.1$ (roll gap), $B=129.6$ (roll width), $L=143$ (roll length), $Co=93$ (roll offset), $U_{ст1}=405$, $U_{ст2}=160$, $U_{ст3}=140$, $U_{ст4}=110$ (roll stand distances), $Dr=165.9$ (roller diameter), $S_r=9.1$ (roller gap), $R_о=569.5$ (roll radius), and -93 (roll offset).
- Right Panel (Controls):** Includes an 'Итерирование' (Iteration) section with checkboxes for 'Итерация по оправкам' (checked), 'Выдвижение оправки - C', 'Расстояние между линейками - L', and 'Расстояние между валками - B'. Below it is the 'Область видимости' (Visibility Area) section with various range settings. The 'Показать/Скрыть' (Show/Hide) section has checkboxes for 'Показать контур сечения валка' (checked), 'Показать размеры' (checked), 'Показать оправку' (checked), 'Показать линейку' (checked), 'Показать гильзу' (checked), and 'Показать размеры очага' (unchecked). The 'Данные' (Data) section lists: Стан: ТПУ-220 ПНТЗ, Валок: 49-559, Оправка: 49.718, Исполнение: -00, Диаметр: 102.0, Линейка: БП-487, Исполнение: -00. At the bottom are three buttons: 'Автонастройка', 'Расчет', and 'Вывести результат'.

Рисунок С.1 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Вкладка «Настройка параметров стана»

Eisen v2.0

Настроечные параметра стана | Параметра валка | **Параметры оправки** | Параметры линейки | Энергосиловые параметры | База данных | Справка

Геометрические параметры

Задать вручную

Сферическая без носика

49.718

-21

49.718

-21

Размеры

Допр, мм	144.0
Lp, мм	245.0
Lo, мм	295.0
dn, мм	39.0
Rсф, мм	517.221
lсф, мм	178.0
αсф, °	4.578
D ₁ , мм	133.27
D ₃ , мм	133.06
l ₃ , мм	30.0
l _п , мм	20.0
l _к , мм	67.0
Δ, мм	3.47

Включить в отчет

Построить

Добавить

Сохранить

Удалить

Схема оправки

Направление прокатки →

Рисунок С.3 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Вкладка «Параметры оправки»

Eisen v2.0

Настроечные параметра стана | Параметра валка | Параметры оправки | **Параметры линейки** | Энергосиловые параметры | База данных | Справка

Геометрические параметры

Задать вручную

Линейки-4

БП-487

-09

БП-487

-09

Размеры

V ₁ , мм	18.01
V ₂ , мм	22.11
V ₃ , мм	0.0
V ₄ , мм	231.89
V ₅ , мм	145.99
V ₆ , мм	90.0
H ₁ , мм	64.82
H ₂ , мм	54.71
H ₃ , мм	75.0
H ₄ , мм	73.0
α _{вх} , °	15.528
α _{вых} , °	22.005
β _{вх} , °	3.207
β _{вх1} , °	1.273
β _{вых} , °	5.001
D _з , мм	210.0
Ось, мм	0.0
Лобщ, мм	508.0
Rск, мм	60.0
База, мм	150.0

Включить в отчет

Построить

Добавить

Сохранить

Удалить

Схема линейки

Направление прокатки →

Рисунок С.4 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Вкладка «Параметры линейки»

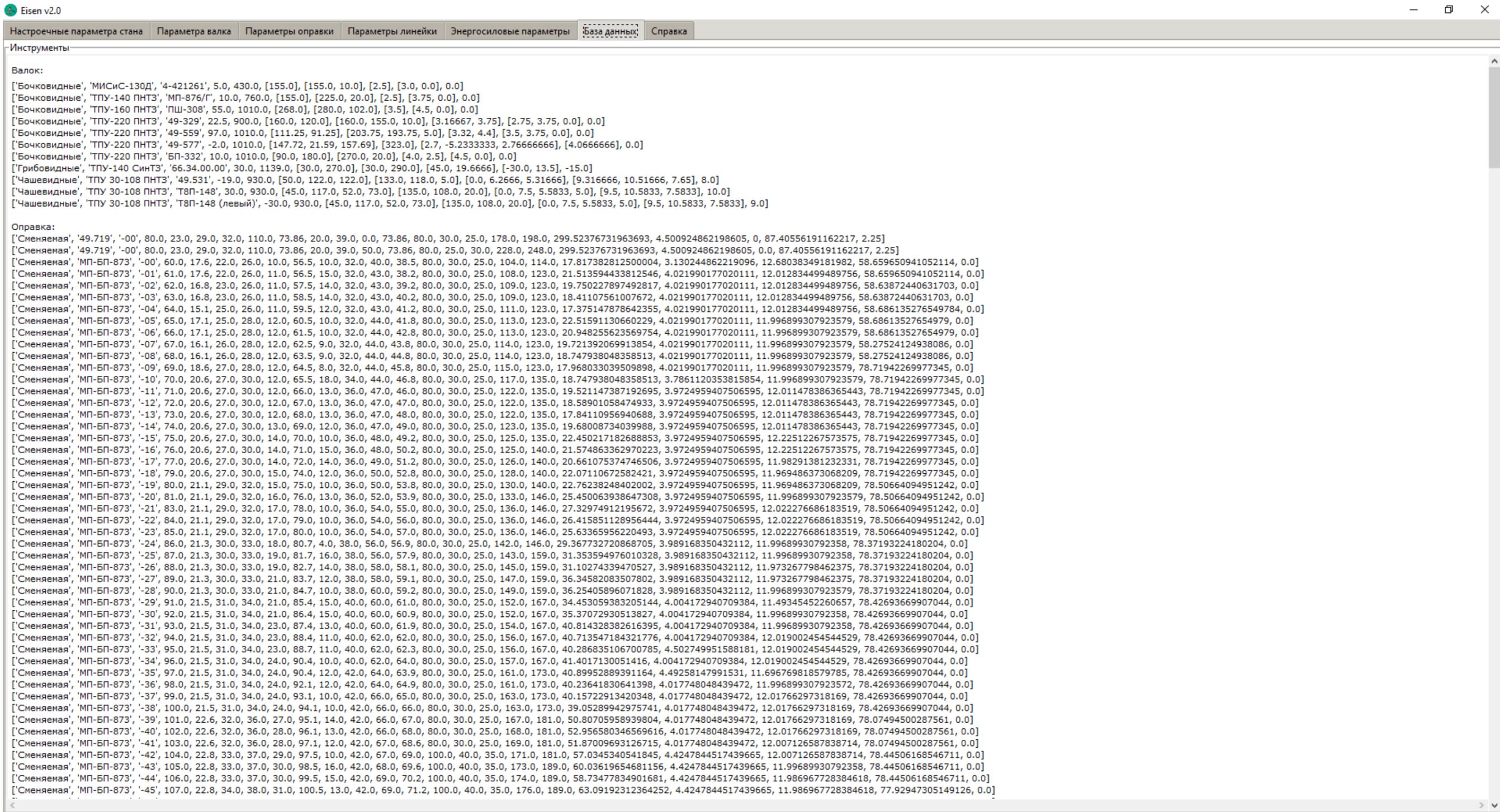


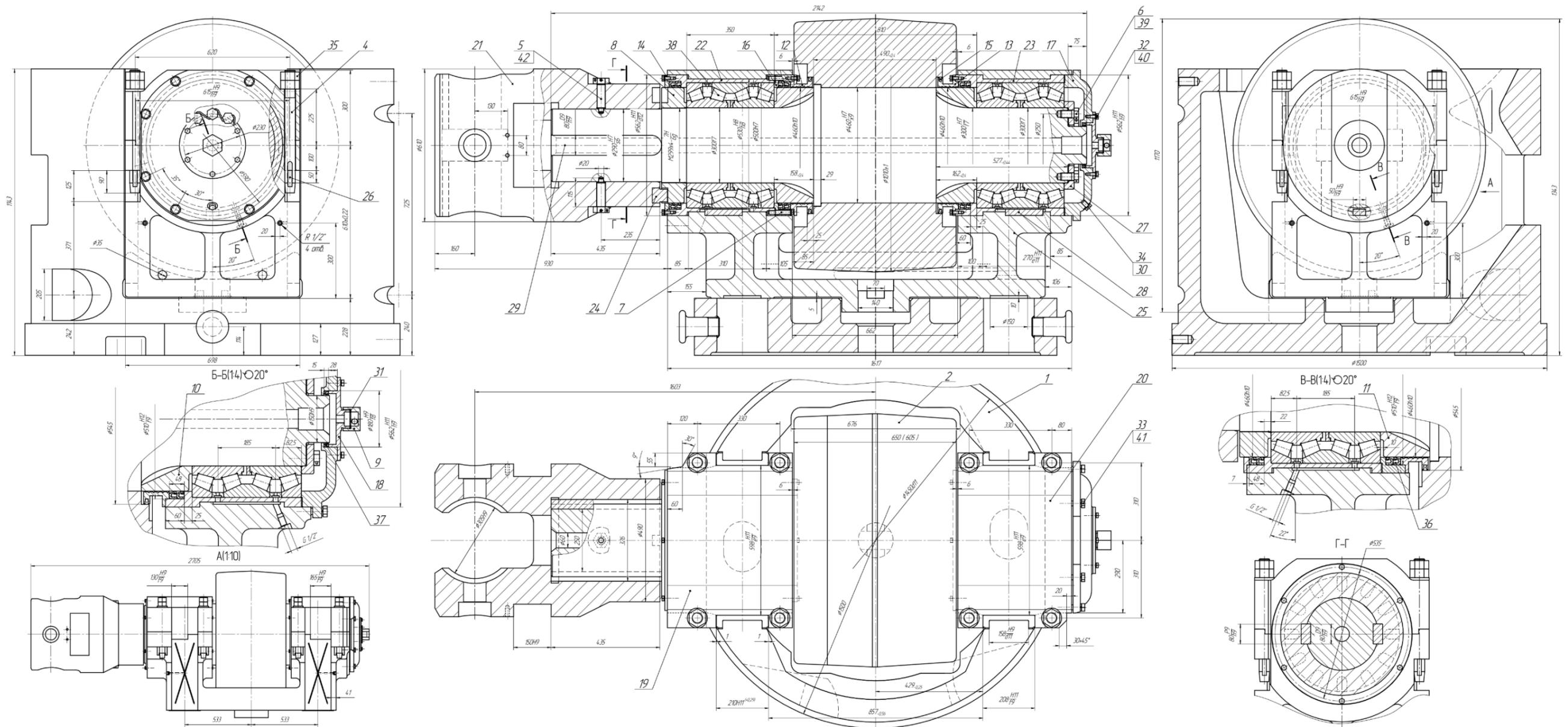
Рисунок С.5 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Вкладка «База данных»



Рисунок С.6 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Вкладка «Справка»

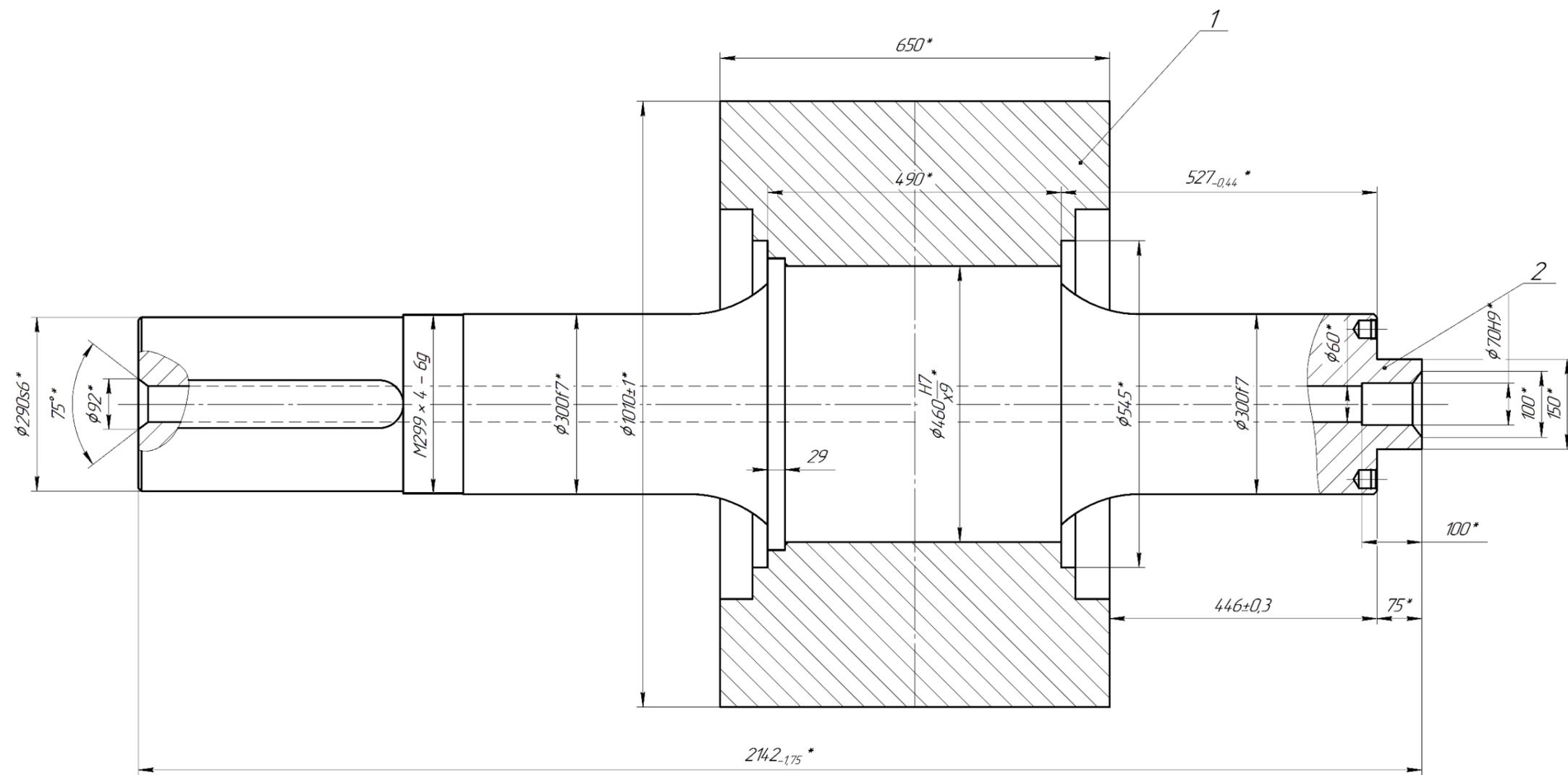
ПРИЛОЖЕНИЕ D

Чертежи валкового узла ТПА 220



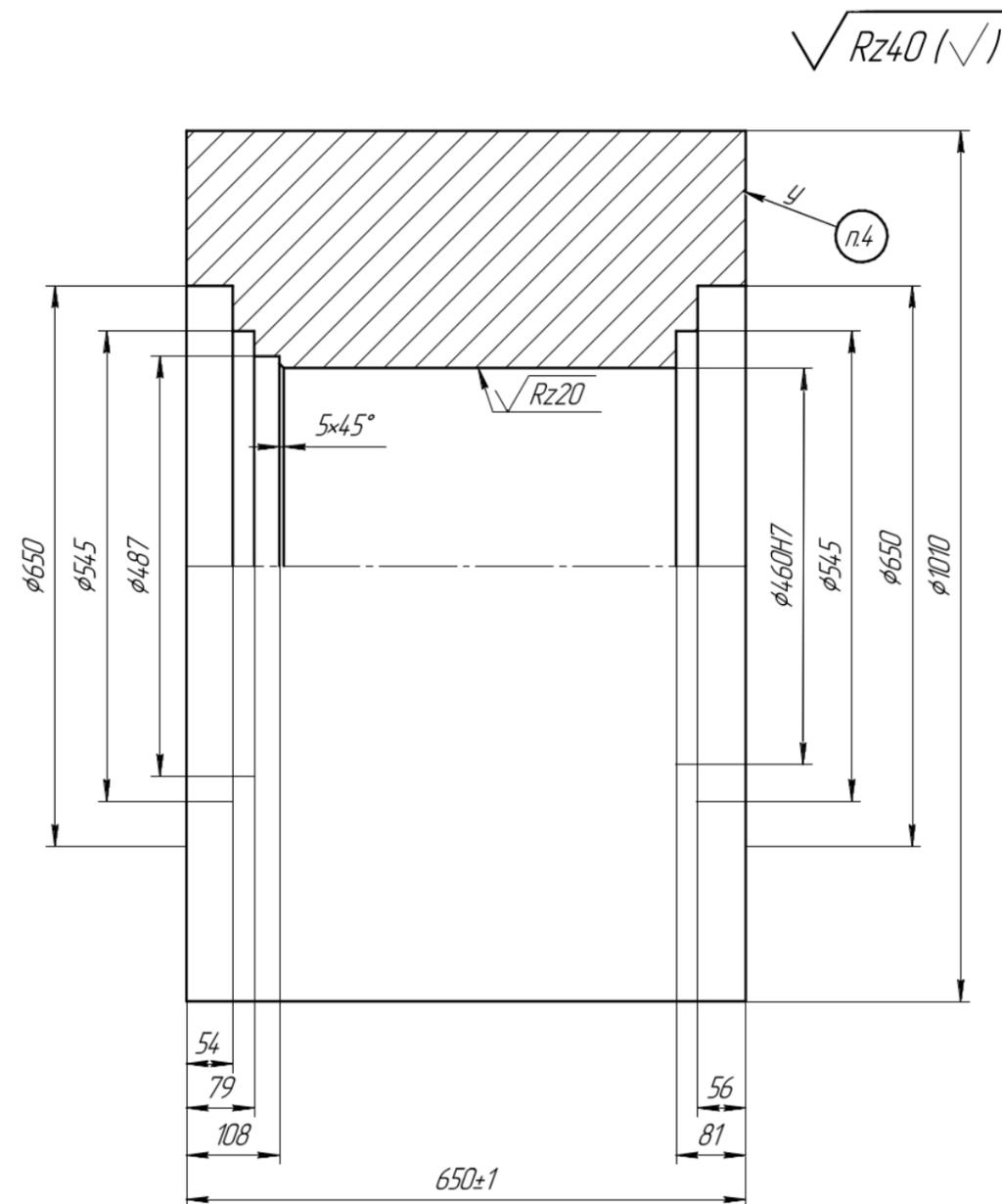
1 – Барабан установочный; 2 – Валок на оси; 3 – ; 4 – Болт М42Х490; 5 – Болт М36; 6 – Болт М30х50; 7 – Болт М16; 8 – Гайка из стали марки 45; 9 – Гайка из стали марки Ст.3; 10 – Кольцо; 11 – Кольцо; 12 – Кольцо; 13 – Кольцо; 14 – Кольцо; 15 – Кольцо уплотнительное; 16 – Крышка; 17 – Крышка; 18 – Крышка; 19 – Крышка левая; 20 – Крышка правая; 21 – Полушфута; 22 – Стакан; 23 – Стакан; 24 – Стопор; 25 – Траверса; 26 – Чека; 27 – Шайба торцевая; 28 – Шпонка; 29 – Шпонка 80х38х442; 30 – Прокладка; 31 – Прокладка; 32 – Болт М12-6gХ25. 36 ГОСТ 7798-70 [55]; 33 – Болт М20-6gХ60. 36 ГОСТ 7798-70 [55]; 34 – Болт М16-6gХ25. 36 ГОСТ 7798-70 [55]; 35 – Гайка М42-7Н. 4 ГОСТ5915-70 [56]; 36 – Манжета НР-460; 460х510х25; 37 – Манжета 1.1-150х180-1 ГОСТ 8752-79 [57]; 38 – Подшипник 77760 ГОСТ 520-2002 [58]; 39 – Проволока 3 ; L=1300 ГОСТ 2590-2006 [59]; 40 – Шайба 12 ГОСТ 6402-70 [60]; 41 – Шайба 20 ГОСТ 6402-70 [60]; 42 – Проволока 2 ; L=1800 ГОСТ 2590-2006 [59].

Рисунок D.1 – Чертёж рабочего валка в сборе



1 – Валок; 2 – Ось валковая

Рисунок D.2 – Чертеж валка на оси прошивного стана ТПА 220



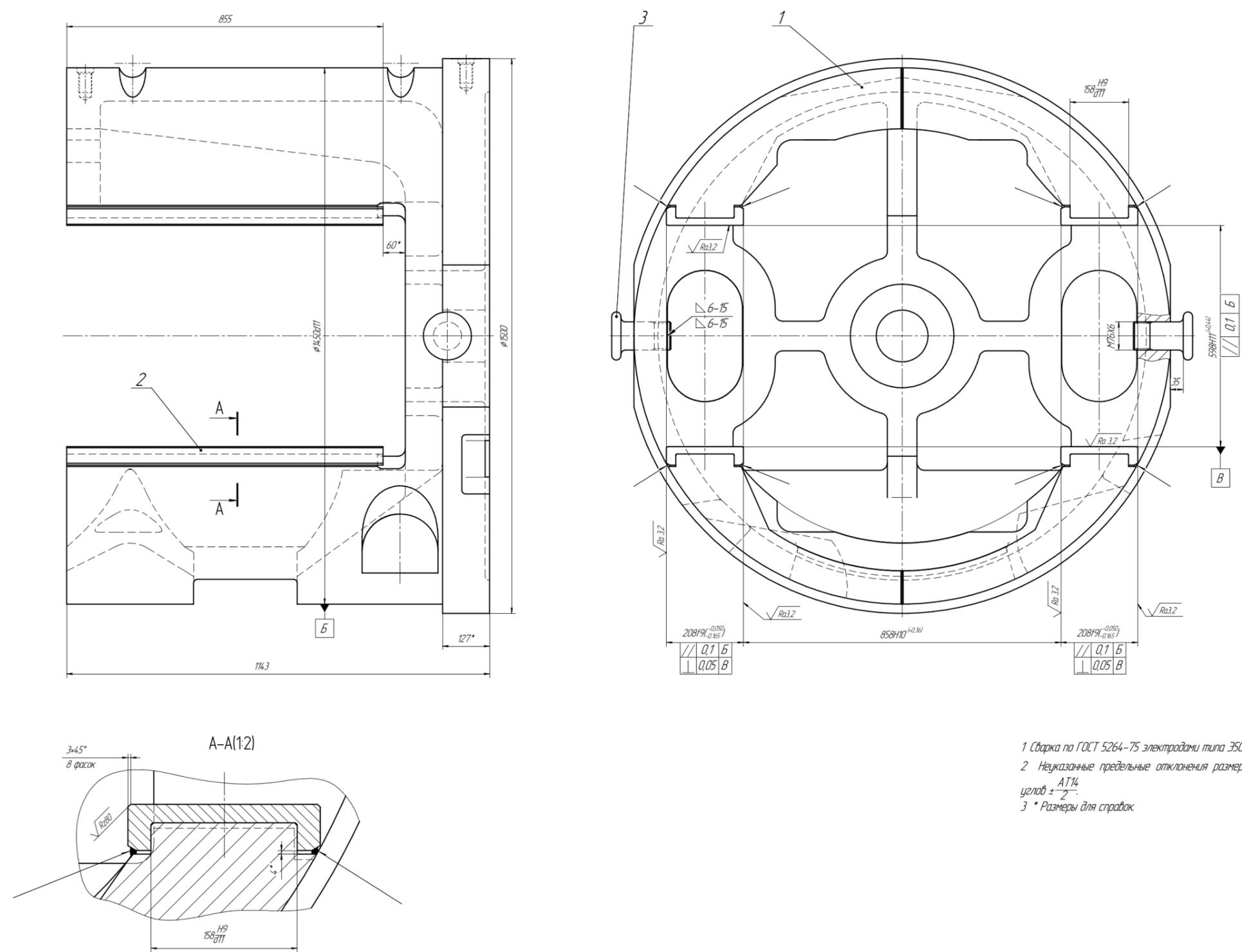
1 Изготовление из поковок Гр. III КП 245 (25) ГОСТ 8479-70.

2 Общие допуски по ГОСТ 30893.1: $H14$, $h14$, $\pm \frac{IT14}{2}$.

3 Твердость 174...217 НВ. Для обеспечения твердости провести нормализацию в цехе №17.

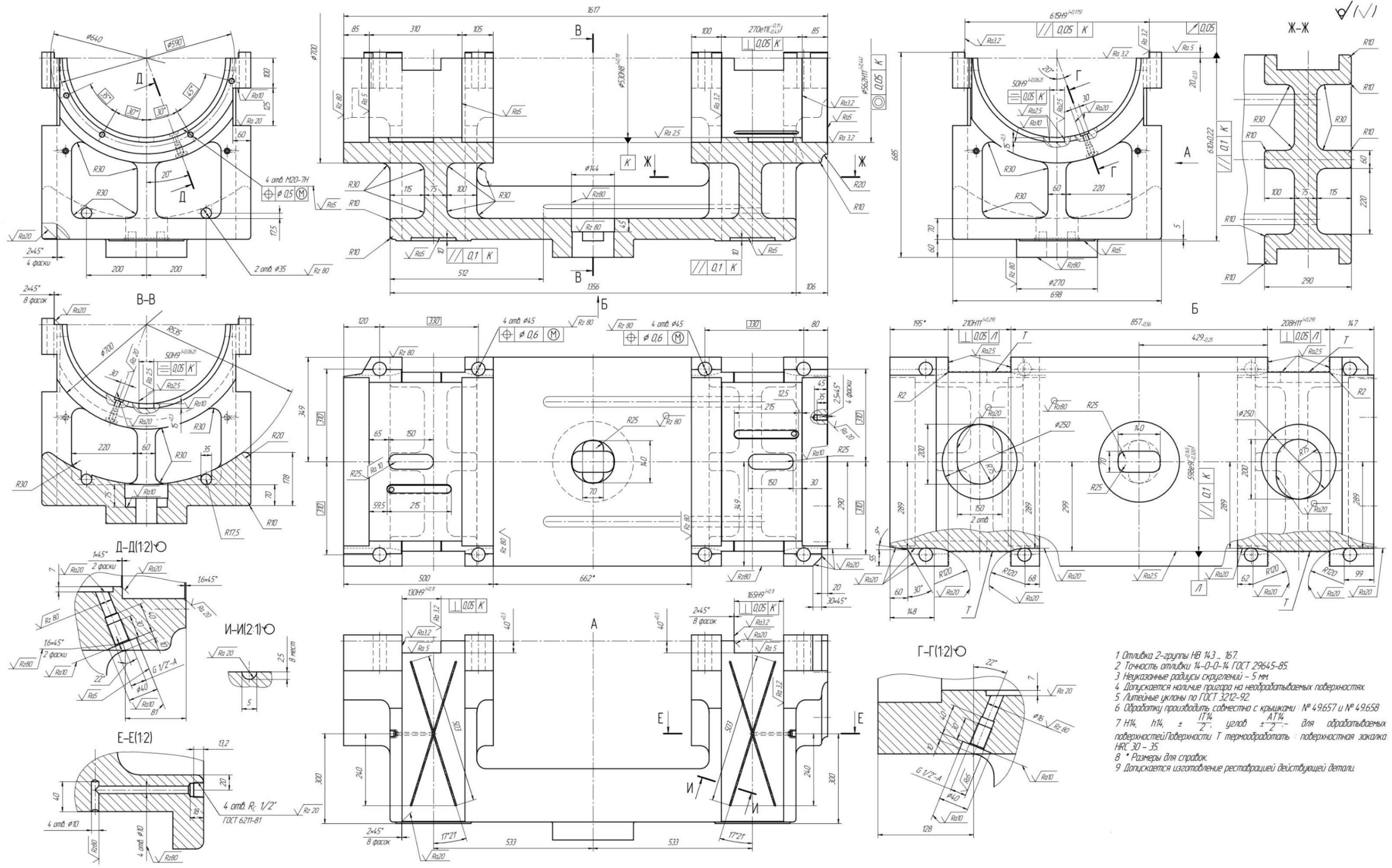
4 Маркировать по номеру чертежа и паспорта

Рисунок D.3 – Чертеж рабочего вала прошивного стана ТПА 220



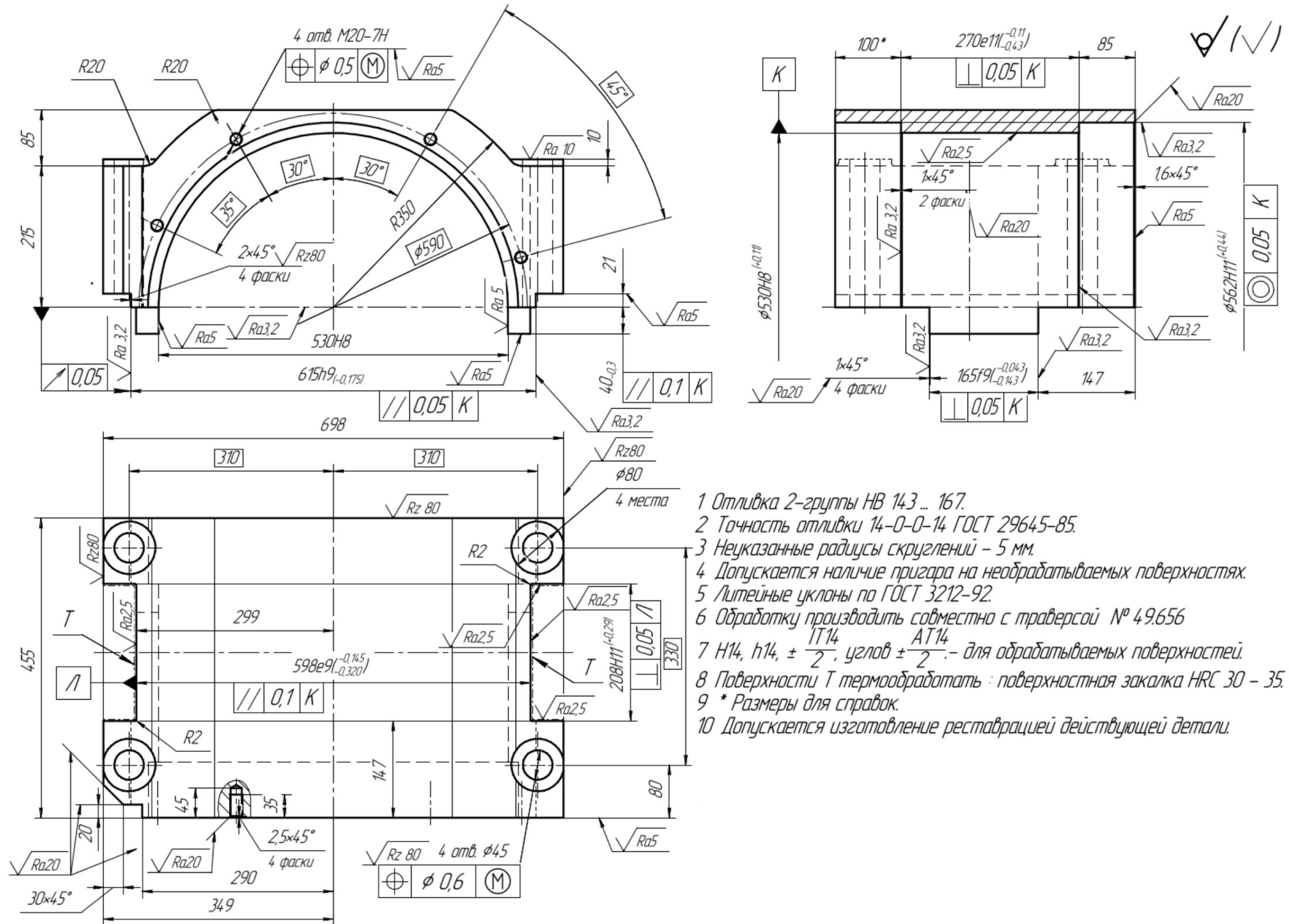
1 – Барабан; 2 – Планка; 3 – Цапфа

Рисунок D.4 – Чертеж установочного барабана прошивного стана ТПА 220



- 1 Отливка 2-группы НВ 143 - 167.
- 2 Точность отливки 14-0-0-14 ГОСТ 29645-85.
- 3 Неуказанные радиусы скруглений - 5 мм.
- 4 Допускается наличие пригара на необрабатываемых поверхностях.
- 5 Литейные уклоны по ГОСТ 3212-92.
- 6 Обработку производить совместно с крышками: № 49657 и № 49658.
- 7 H14, h14, $\pm \frac{IT14}{2}$, угол $\pm 2^\circ$ для обрабатываемых поверхностей. Поверхности Т термодобавить: поверхностная закалка HRC 30 - 35.
- 8 * Размеры для справок.
- 9 Допускается изготовление реставрацией действующей детали.

Рисунок D.6 – Чертеж траверсы ТПА 220 из стали 35Л ГОСТ 977-88 [61]



- 1 Отливка 2-группы НВ 143 ... 167.
- 2 Точность отливки 14-0-0-14 ГОСТ 29645-85.
- 3 Неуказанные радиусы скруглений - 5 мм.
- 4 Допускается наличие пригара на необрабатываемых поверхностях.
- 5 Литейные уклоны по ГОСТ 3212-92.
- 6 Обработку производить совместно с траверсой № 49.656
- 7 Н14, h14, $\pm \frac{IT14}{2}$, угол $\pm \frac{AT14}{2}$ - для обрабатываемых поверхностей.
- 8 Поверхности Т термообработать: поверхностная закалка HRC 30 - 35.
- 9 * Размеры для справок.
- 10 Допускается изготовление реставрацией действующей детали.

Рисунок D.7 – Чертёж крышки правой ТПА 220 из стали 35Л ГОСТ 977-88 [61]

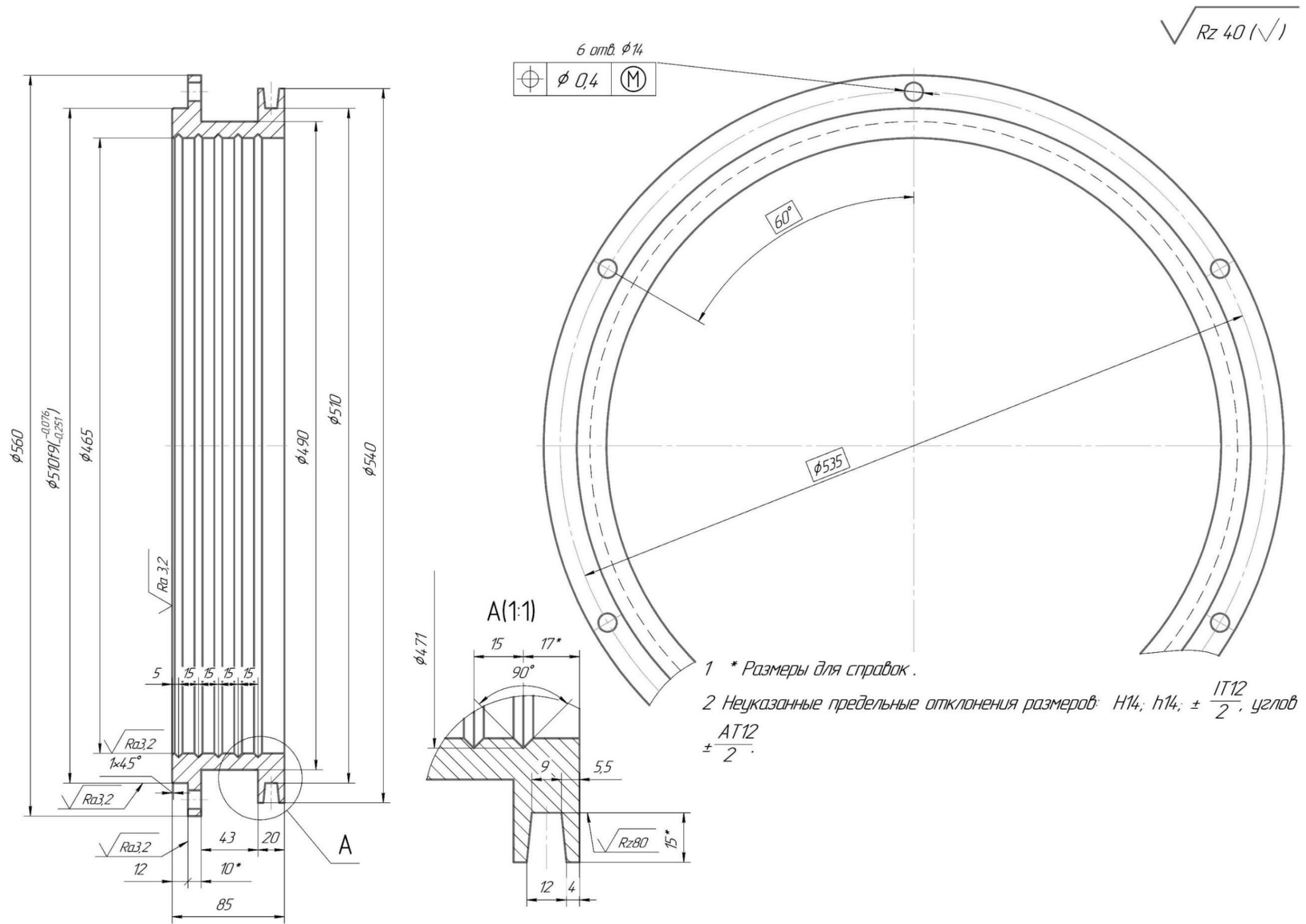


Рисунок D.9 – Чертеж кольца ТПА 220 из стали 45 ГОСТ 1050–2013 [62]

ПРИЛОЖЕНИЕ F

Чертежи инструментов трубопрокатного агрегата ТПА 220

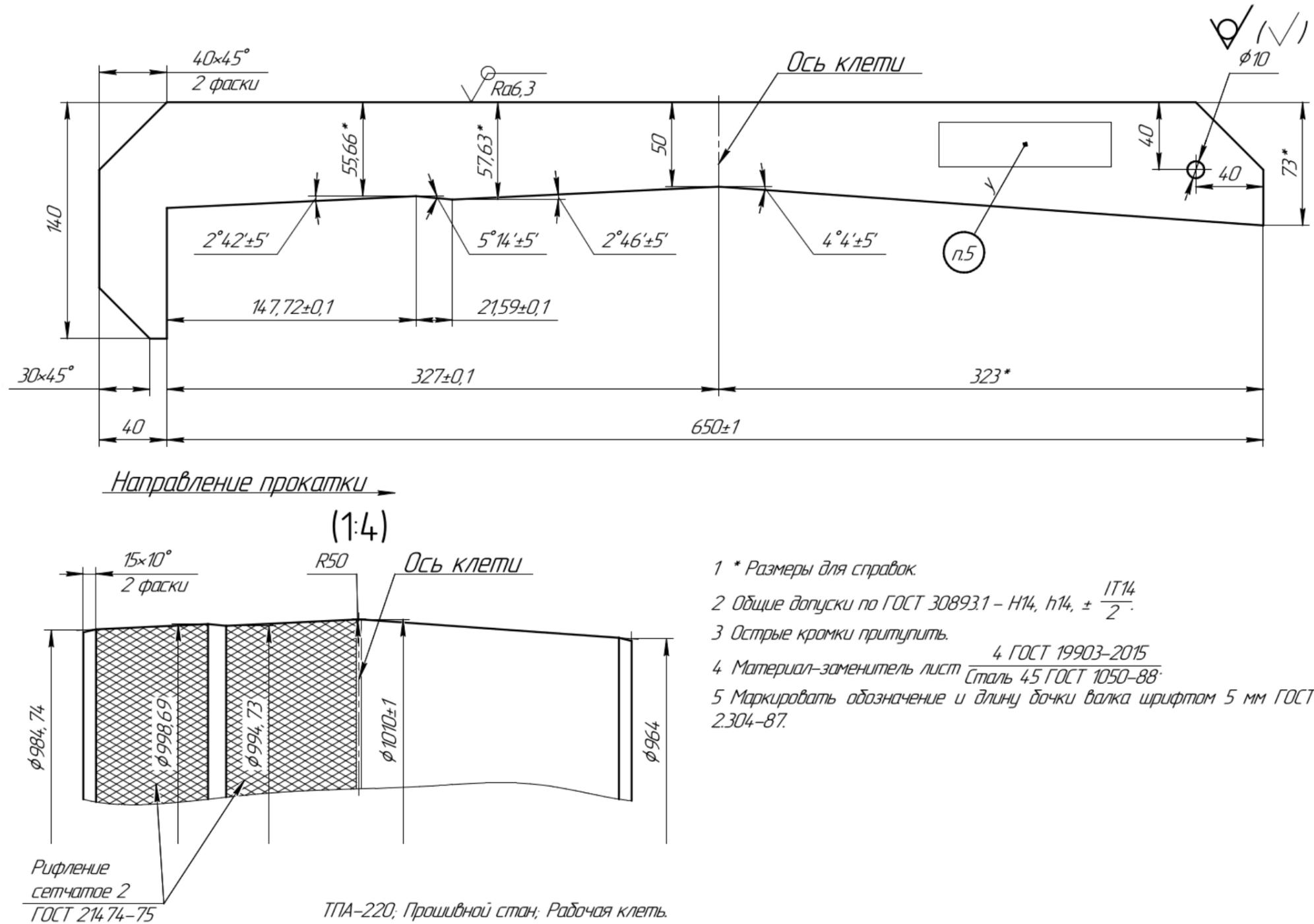


Рисунок F.1 – Чертеж калибровки рабочего вала ТПА 220

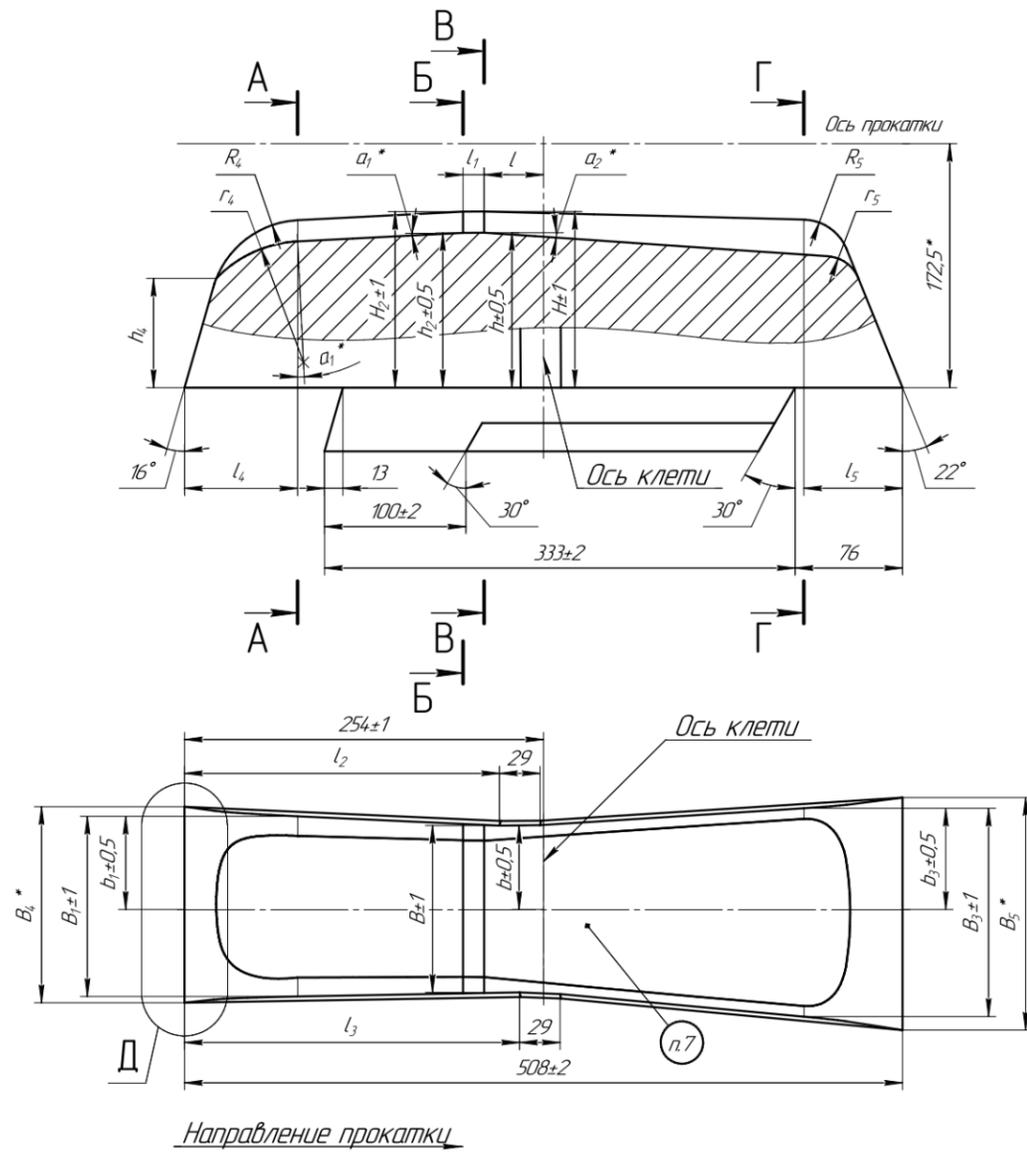


Рисунок 1

- 1 * Размеры для справок
- 2 Рабочую поверхность желоба (допускается очистка всех поверхностей) зачистить абразивным аппаратом, шлифовать запрещено
- 3 Радиус скругления r_5 желоба и реборд выполнить в литье
- 4 Отливку производить с применением технологии ХТС

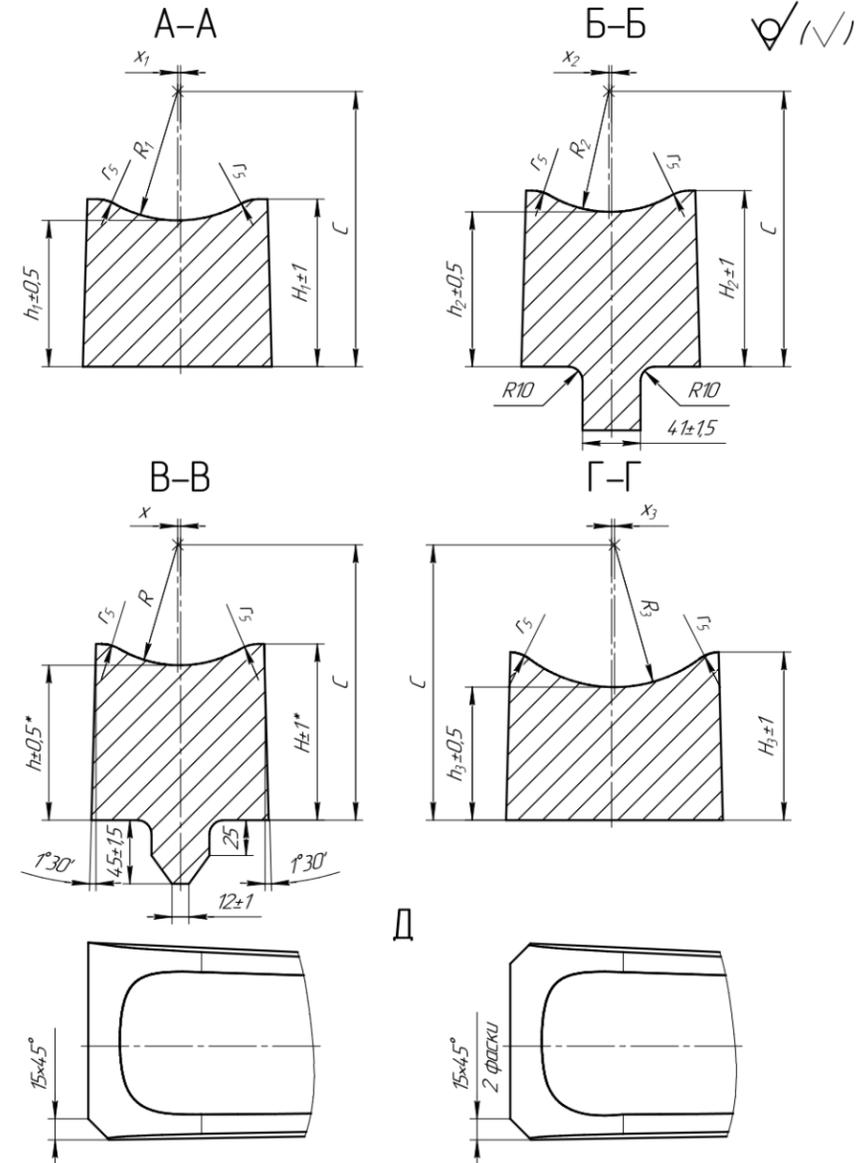


Рисунок 2

Рисунок 3

Профильный стан. Рабочая клетка.

Рисунок F.2 – Чертеж калибровки направляющей линейки ТПА 220

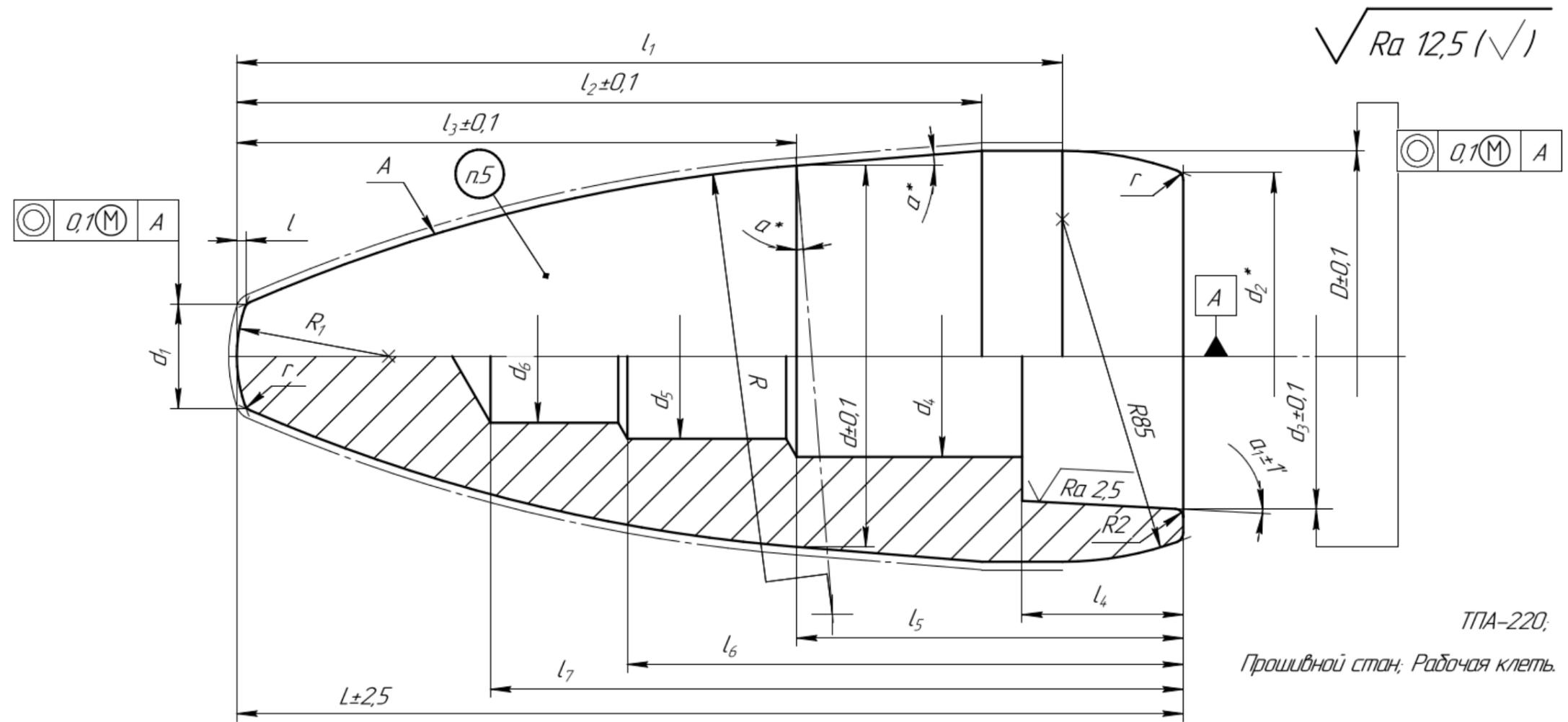


Рисунок 1

- 1 * Размеры для справок.
- 2 Контроль геометрических параметров проводить до термообработки.
- 3 Термообработка – двойная нормализация с отпуском.
- 4 На поверхности А не допускаются бугры, вмятины, резкие переходы одной поверхности в другую.
- 5 Маркировать маркером обозначение чертежа и диаметр оправки шрифтом 20 мм ГОСТ 2.304-87.
- 6 Общие допуски по ГОСТ 30893.1 – Н14, h14, $\pm \frac{IT14}{2}$.

Оправка
 водоохлаждаемая
 Сталь 30ХН3А ГОСТ 4543-71

Рисунок F.3 – Чертеж калибровки оправки ТПА 220

ПРИЛОЖЕНИЕ G

Чертежи оправочного узла автоматического стана ТПА 220

Рисунок 1

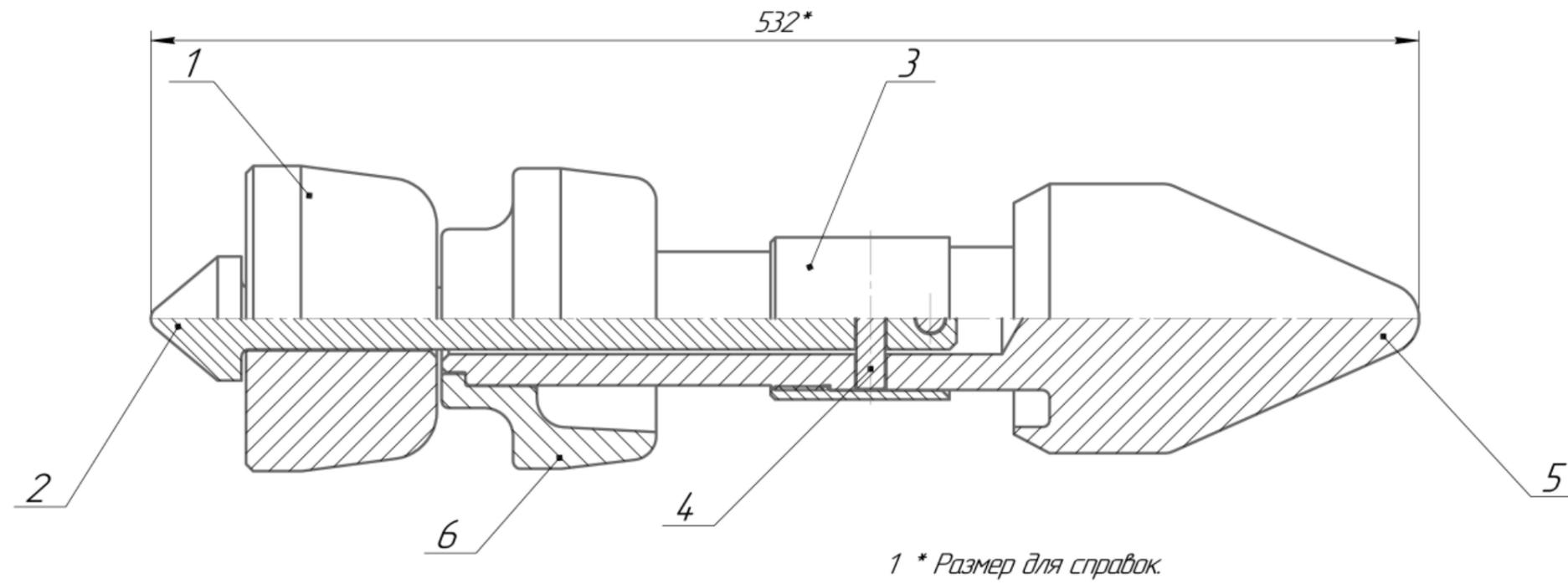
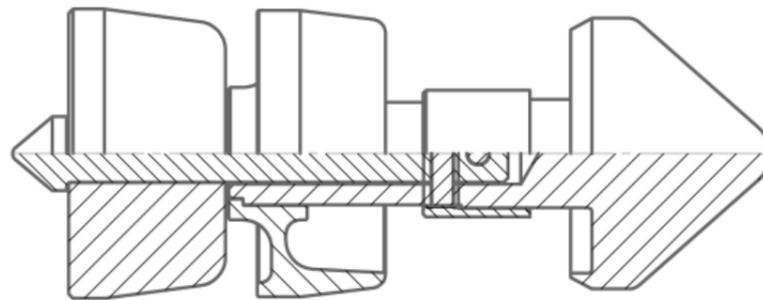


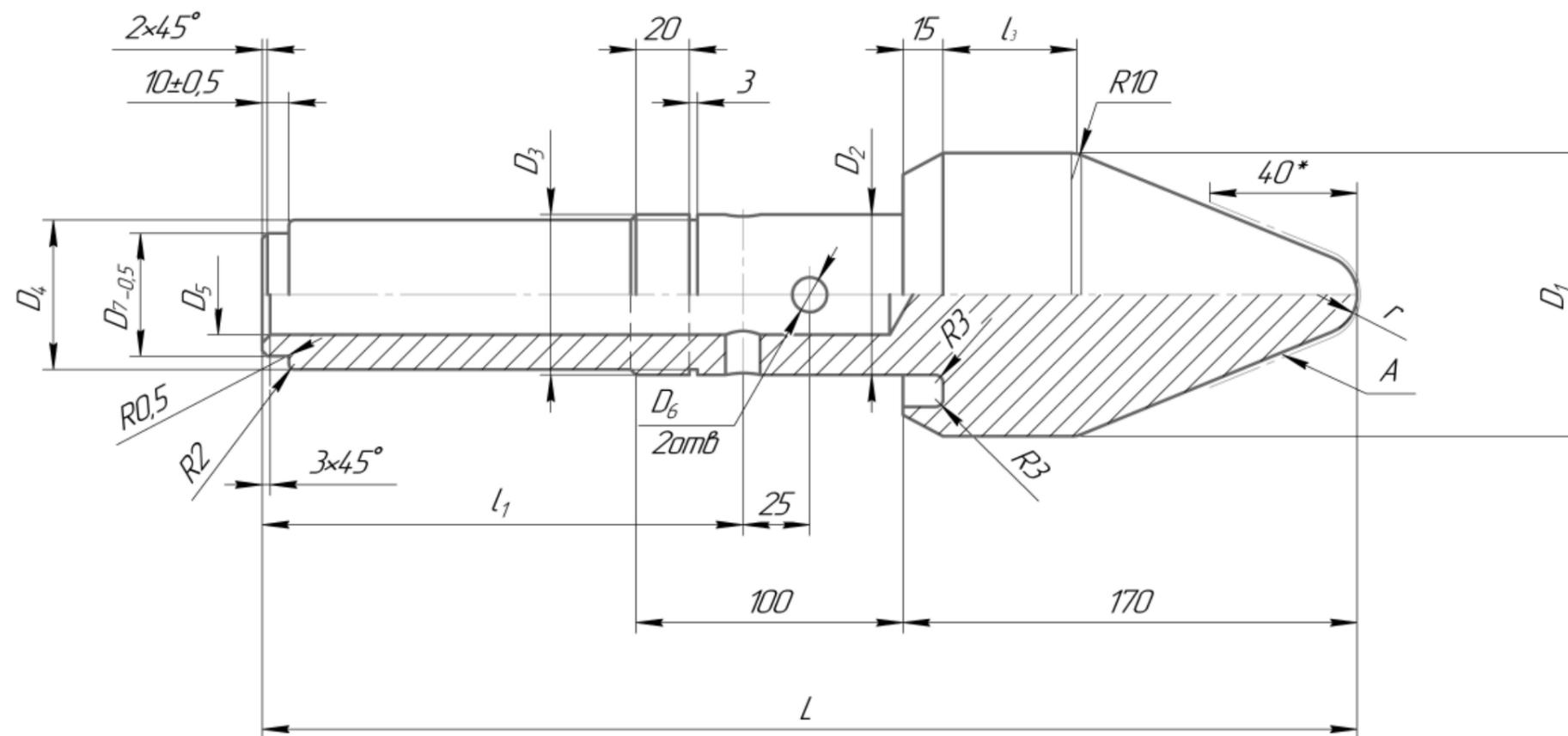
Рисунок 2 (1:4)



1 – Оправка; 2 – Шпилька; 3 – Гайка; 4 – Штифт; 5 – Головка; 6 – Втулка

Рисунок G.1 – Чертеж оправочного узла автоматического стана ТПА 220

$\sqrt{Ra12,5}$



1 * Размер для справок.

2 Общие допуски по ГОСТ 30893.1-2002: H14, h14, $\frac{\pm IT14}{2}$.

3 Поверхность А: Поверхностная закалка концов головки на ВЧУ на длину 35...40 мм. Температура закалки 830...860 °С.

Рисунок G.2 – Чертёж головки оправочного узла автоматического стана ТПА 220

✓(N)

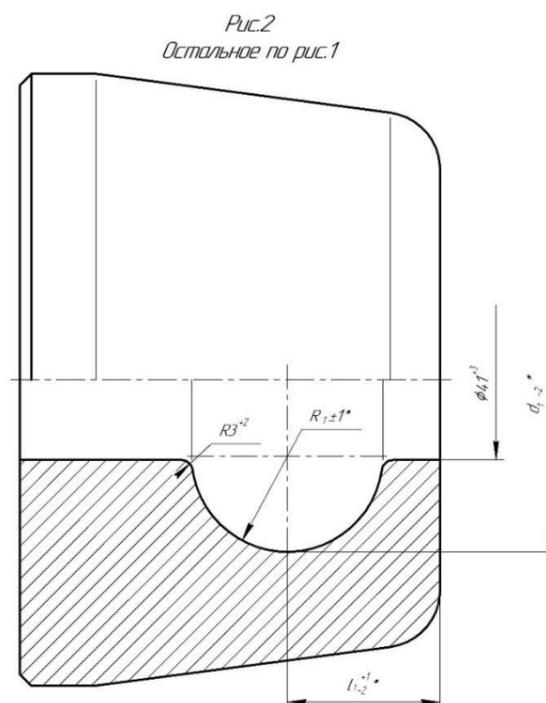
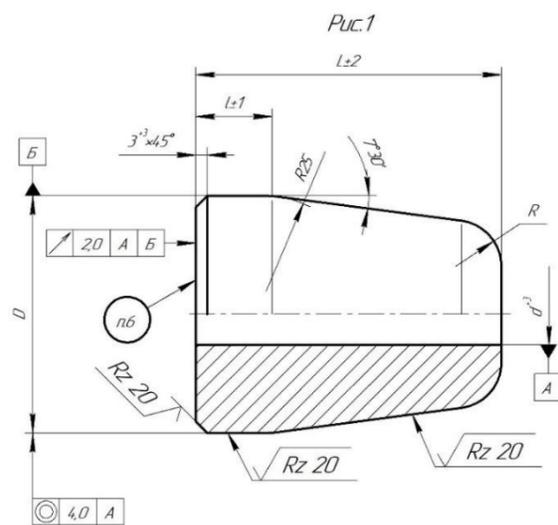


Рисунок 4. Остальное по рисункам 1 и 2

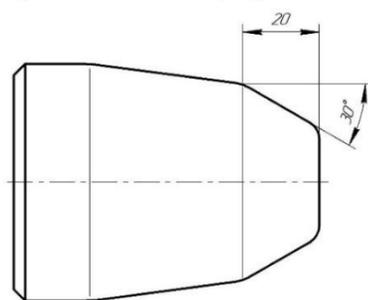
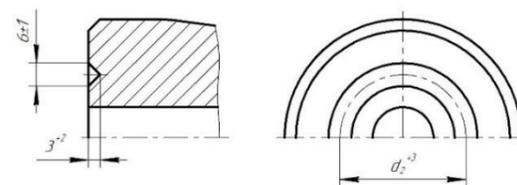
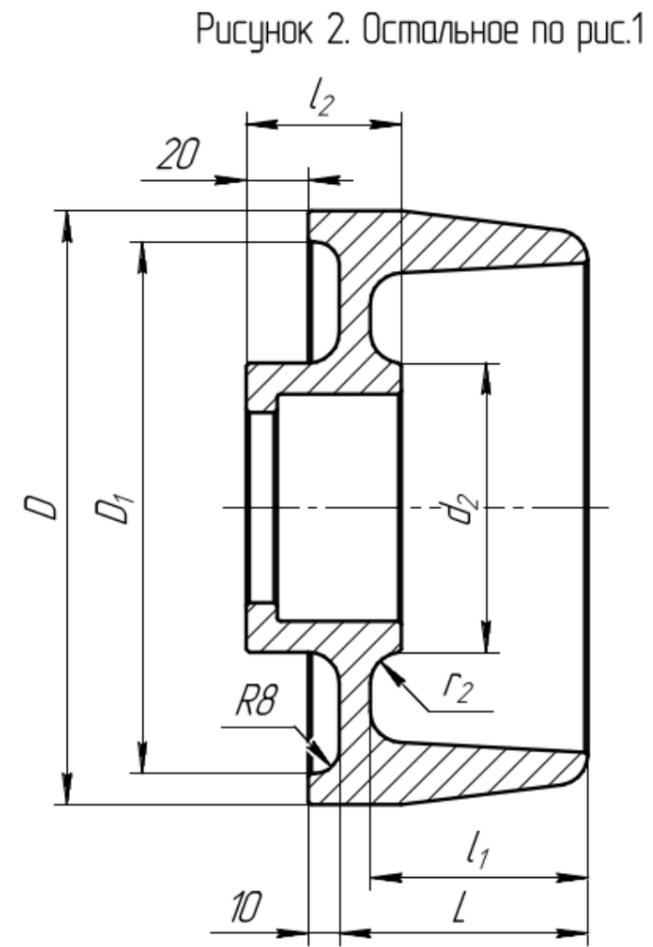
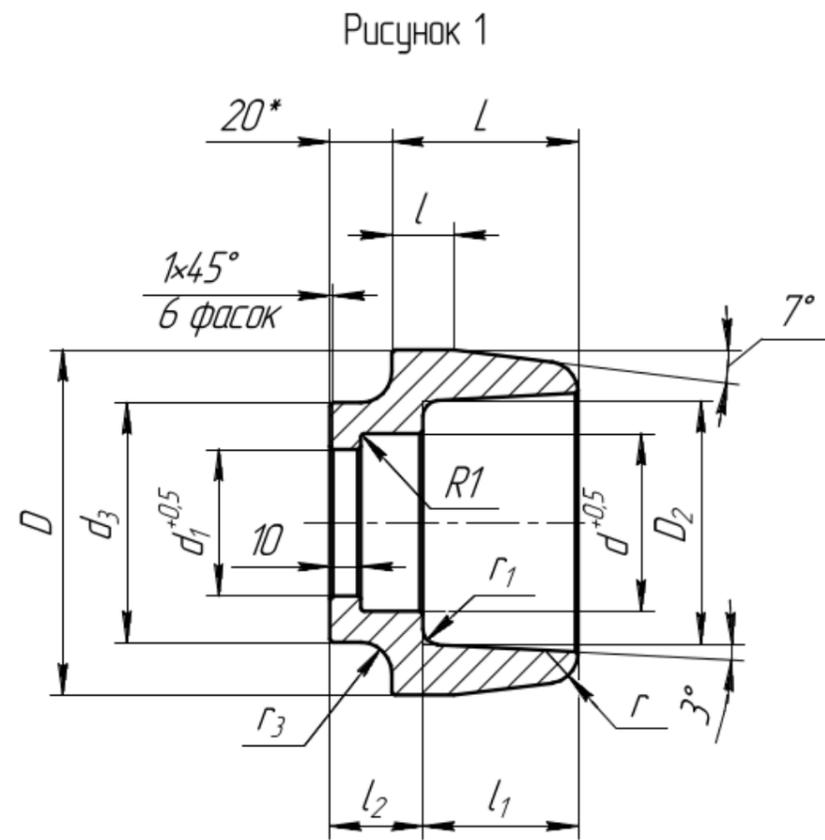


Рисунок 3
Остальное по рисунку 1



1. *Размер обеспечивается инструментом.
2. Термическая обработка по ТИ 159-МГ-02, твердость 244-302НВ, оправки из сплава никарин термической обработке не подлежат.
3. Допускается вместо фаски 3° x 45° выполнять скругление радиусом 10 мм.
4. Общие допуски по ГОСТ 30893.1 Н14, h14, ±IT14/2.
5. Химический состав, изготовление и приемку оправок из сплава никарин - согласно ТИ 159-МГ-20, из сплава 145Х16Н1 - согласно ТИ 159-МГ-49.
6. На опорной тарце оправки краской маркировать D ном. (см. табл.1) На оправке из сплава никарин, кроме того, литьем наносить маркировку согласно рис.3 и табл.3
7. Точность отливки 10-0-0-8 ГОСТ 26645-85.

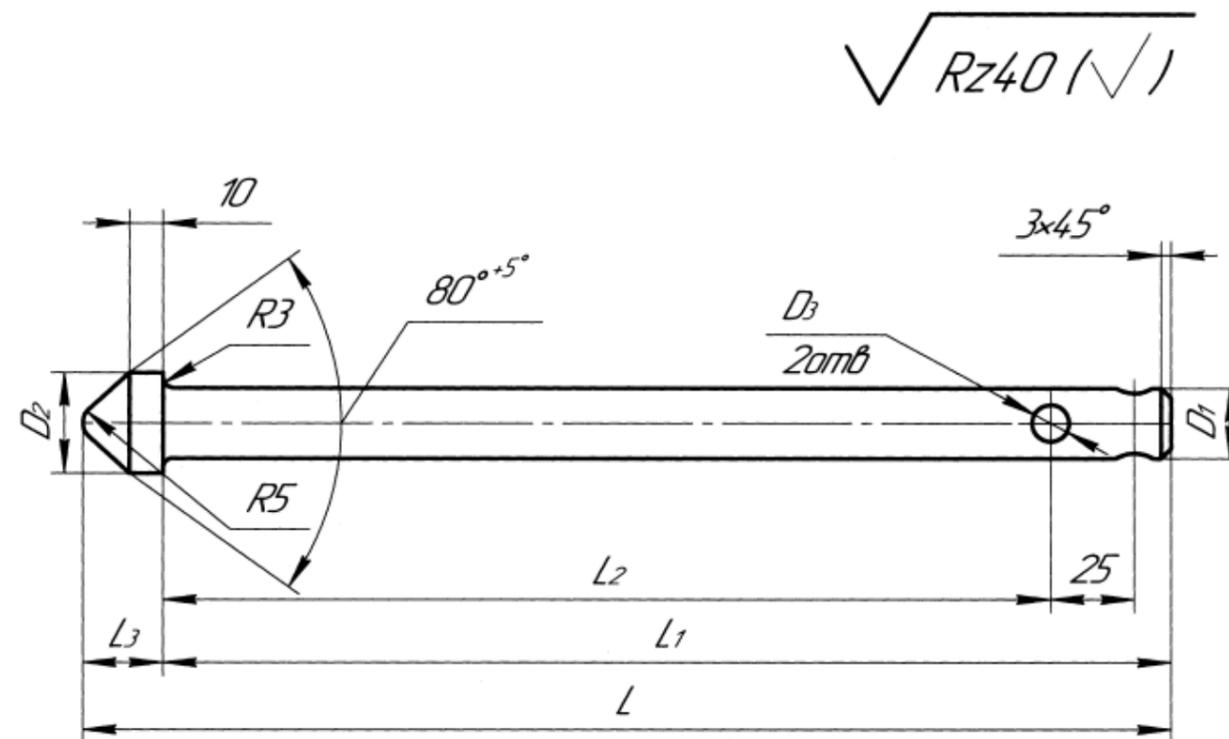
Рисунок G.3 – Чертеж оправки автоматического стана ТПА 220



1 * Размеры для справок.

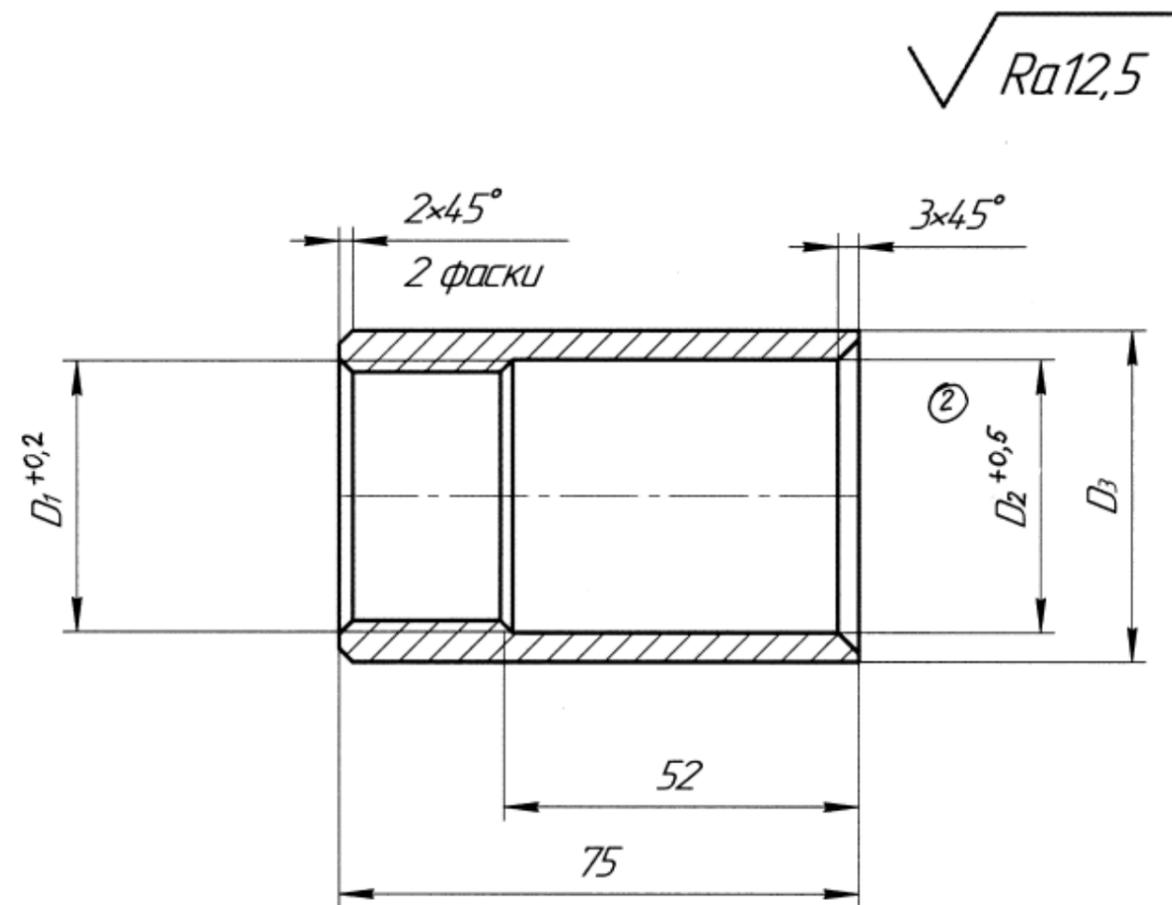
2 Общие допуски по ГОСТ 30893.1-2002: H14, h14, $\frac{\pm IT14}{2}$.

Рисунок G.4 – Чертеж втулка оправочного узла автоматического стана ТПА 220



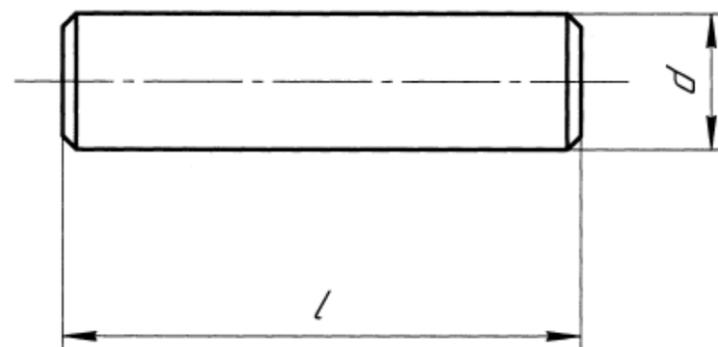
- 1 Режим термообработки шпилек на готовом размере.
- 2 Нагрев до $870-880^{\circ}\text{C}$, выдержка 15-20 мин.
- 3 Охлаждение в масле.
- 4 Материал заменитель: сталь марки 60ХФА ГОСТ Р 53932-2016
- 5 Отпуск в течение 1 ч: при $220-230^{\circ}\text{C}$ для стали марки 30ХГСА, при $450-500^{\circ}\text{C}$ для стали марки 60ХФА, твердость 32...42 HRC₃.

Рисунок G.5 – Чертеж шпильки оправочного узла автоматического стана ТПА 220



- 1 Общие допуски по ГОСТ 30893.1: $H14, h14, \pm \frac{IT14}{2}$. (2)
- 2 Резьбу по среднему диаметру прослабить на 0,5 мм.

Рисунок G.6 – Чертеж гайки оправочного узла прошивного стана



- 1 Термообработка-улучшение 207...262 НВ.
- 2 Материал-заменитель: сталь марки 55С2 ГОСТ 14.959-2016.

Рисунок G.7 – Чертёж штифта оправочного узла автоматического стана ТПА 220