

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНО УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИСИС»

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Гончарук Александр Васильевич

Москва – 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

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. 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.

Цели и задачи работы

Целью работы является совершенствование технологии прокатки труб на ТПА с автомат 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 линейек, а также обновленная таблица прокатки для новых инструмента 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.

Основные 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.

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».

Апробация работы.

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.

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.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 81 наименований отечественных и зарубежных авторов. Текст диссертации содержит 159 страниц машинописного текста, включающего 22 таблиц, 127 рисунков и 4 приложения.

ОСНОВНЫЕ СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, поставлены её цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость, а также указаны основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор научно-технической литературы. Рассмотрены технологические схемы производства горячекатаных бесшовных труб на трубопрокатных агрегатах с автоматическим станом и методики проектирования инструмента. Описание основных видов дефектов горячекатаных труб и причин их образования также включено.

Анализ научно-технической литературы по производству бесшовных горячекатаных труб на ТПА с автоматическим станом позволил сделать следующие выводы:

Основные дефекты трубопрокатного происхождения образуются как в процессе прошивки на станах винтовой прокатки, во многом связанных с настроечными параметрами прошивного стана, так и при раскатке в автоматическом стане, что диктует необходимость разработки технологии с использованием цилиндрической оправки;

Существующие методики расчета и компьютерные программы не позволяют точно определить геометрические параметры очага деформации для процесса винтовой прокатки и не обеспечивают возможность итерационного расчета для различных типов прошивных станов;

Уменьшение количества дефектов в виде продольной складки на концах черновых труб в процессе раскатки на автоматическом стане существенно снизит технологические потери и облегчит дальнейшую прокатку на обкатных машинах без простоев оборудования.

Во второй главе разработан алгоритм расчета геометрических параметров очага деформации при прошивке. Выявлено влияние пространственного положения осей заготовки и валков прошивного стана, направляющего инструмента и его установки в очаге деформации на параметры циклического формоизменения. Получены зависимости геометрических и деформационных параметров при каждом частном обжатии и на отдельных участках очага деформации от настройки стана, калибровки инструмента, его положения в очаге деформации, размеров исходных заготовок и получаемых гильз, а также других факторов.

Приведены основные результаты расчетов для трёх типов валков: бочковидных, грибовидных и чашевидных.

В 3D модели валки прошивного стана условно делятся 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 . При расчете геометрических параметров очага деформации для

На основе разработанного алгоритма расчёта была создана компьютерная программа «Eisen v2.0». Она предназначена для расчёта геометрических параметров очага деформации, настроечных параметров прошивного стана, а также калибровок инструментов. Программа обеспечивает оперативное и высокоточное определение настроечных параметров прошивного стана, что способствует улучшению качества прокатываемых труб.

Разработанная программа позволяет рассчитывать параметры очага деформации для бочковидных, чашевидных и грибовидных валков прошивного стана. Программа написана на языке программирования Python версии 3.9. Интерфейс программы представлен на рисунке 2.3.

Проведён сравнительный анализ результатов расчёта, выполненного по разработанному алгоритму, с данными графического метода с использованием программы «КОМПАС 3D» и фактическими замерами параметров очага деформации. Результаты анализа приведены в таблицах 2.1, 2.2 и 2.3.

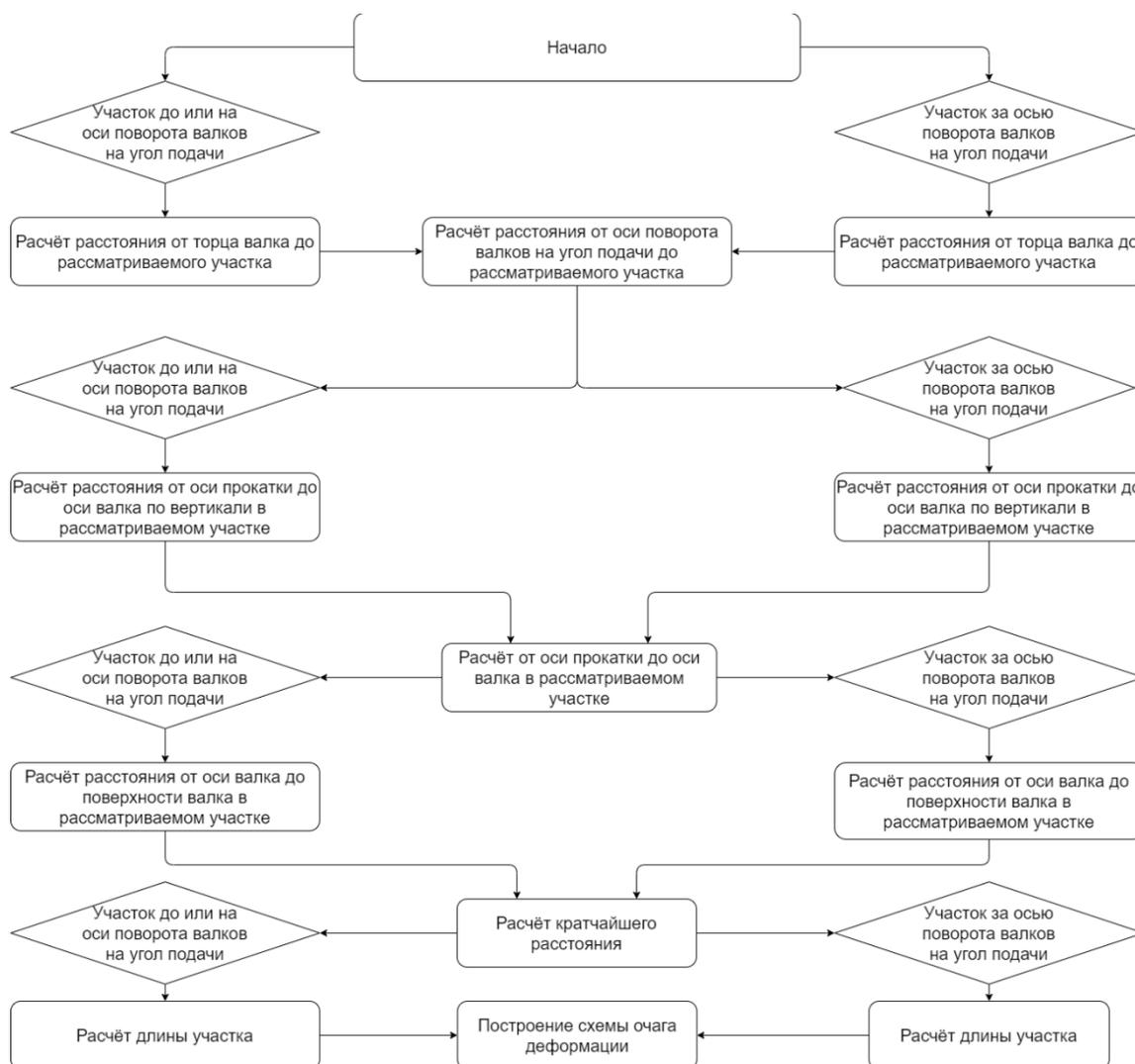


Рисунок 2.2 – Блок-схема для определения кратчайшего расстояния в очаге деформации прошивного стана

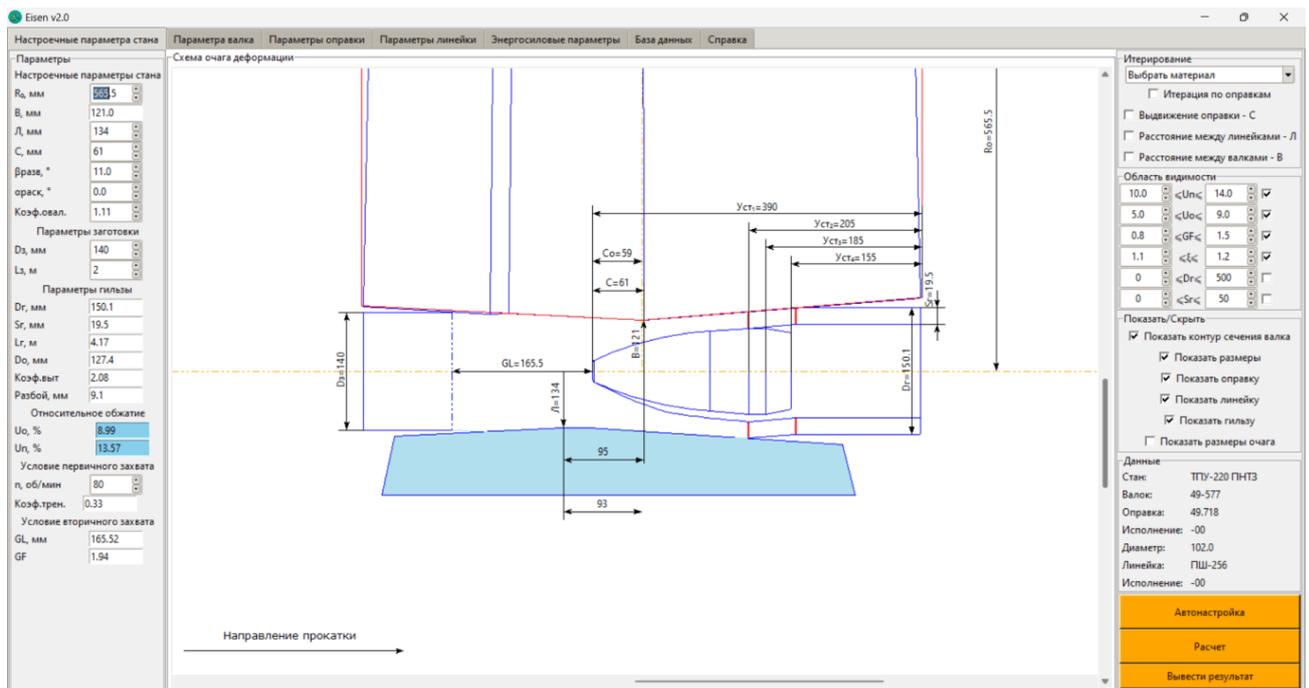


Рисунок 2.3 – Интерфейс программы «Eisen v2.0». Главное окно

Таблица 2.1 – Результаты расчёта профиля чашевидного вала

Метод определения	Кратчайшее расстояние от оси прокатки до профиля вала, мм								Длина очага деформации, мм L
	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

Таблица 2.2 – Результаты расчёта профиля бочковидного вала

Метод определения	Кратчайшее расстояние от оси прокатки до профиля вала, мм						Длина очага деформации, мм L
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	
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

Таблица 2.3 – Результаты расчёта профиля грибовидного валка

Значение	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	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 показывают, что геометрические параметры очага деформации, рассчитанные по разработанному алгоритму, допускают максимальное отклонение от фактических замеров на уровне 0,69%, в то время как результаты, полученные в программе «КОМПАС 3D», показывают максимальное отклонение на уровне 2,17%.

На основе разработанного алгоритма расчёта была написана компьютерная программа «Eisen v2.0» для расчёта геометрических параметров очага деформации и настроечных параметров прошивного стана, расчёта калибровок инструментов и оперативного определения настроечных параметров прошивного стана с высокой точностью, что способствует повышению качества прокатываемых труб. Разработанная программа позволяет выполнять расчёт параметров очага деформации для бочковидных, чашевидных и грибовидных валков прошивного стана. Программа разработана на языке программирования Python 3.9. Интерфейс программы показан на рисунке 2.3.

Отличительной особенностью разработанной программы является использование базы данных для хранения геометрических параметров калибровок технологического инструмента.

Таблица 2.4 – Настроечные 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

Таблица 2.5 – Результаты по итогам расчетов для D/S=12,1

Наименование	Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм
Номинальное значение	224	18,5
«QForm»	225,376	18,713
Отклонение, %	0,614	1,15
«Eisen v2.0»	224,4	18,7
Отклонение, %	0,18	1,08

Дополнительно было проведено моделирование процесса прошивки в среде «QForm» с целью сравнительного анализа с результатами расчёта по разработанной программе «Eisen v2.0». Исследование было проведено для гильз с D/S, равным 12,1 и 24.

Результаты расчётов представлены в таблицах 2.4, 2.5, 2.6, 2.7.

Таблица 2.6 – Настроечные 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

Таблица 2.7 – Результаты по итогам расчетов для D/S= 24

Наименование	Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм
Номинальное значение	168,0	7,00
«QForm»	166,5	7,16
Отклонение, %	0,89	2,28
Eisen v2.0	168,1	7,10
Отклонение, %	0,06	1,42

В третьей главе рассмотрены вопросы реконструкции валковых узлов прошивного стана ТПА 220 с целью повышения качества труб по внутренним пленам и расширения сортамента. На основании результатов моделирования процесса прошивки предложено дополнительно добавить «зоны отдыха» на участке входного конуса и удлинить калибрующий участок выходного конуса в очаге деформации. Для этого необходимо изменить конструкцию барабана и валковых узлов рабочего вала. По программе «Eisen v2.0» рассчитаны параметры новой таблицы прокатки и калибровки инструмента для удлиненной бочки вала прошивного стана ТПА 220.

После проведения реконструкции была выполнена экспериментальная прокатка на прошивном стане ТПА 220. Результаты промышленного опробования новых режимов прокатки труб из непрерывнолитых заготовок подтвердили снижение количества дефектов на внутренней и наружной поверхности труб (рис. 3.1 и 3.2).

Опытные прокатки показали, что выход годной продукции увеличился на 12,9%, а уровень брака по внутренним пленам сократился на 20,27% (рис. 3.1 и 3.2).

Для подтверждения адекватности расчетов по программе «Eisen v2.0» был проведён сравнительный анализ размеров заторможенной в стане заготовки-гильзы (рис. 3.3) с результатами расчёта по программе «Eisen v2.0» (рис. 3.4).



Рисунок 3.1 – Статистические данные по качеству труб при опытной прокатке

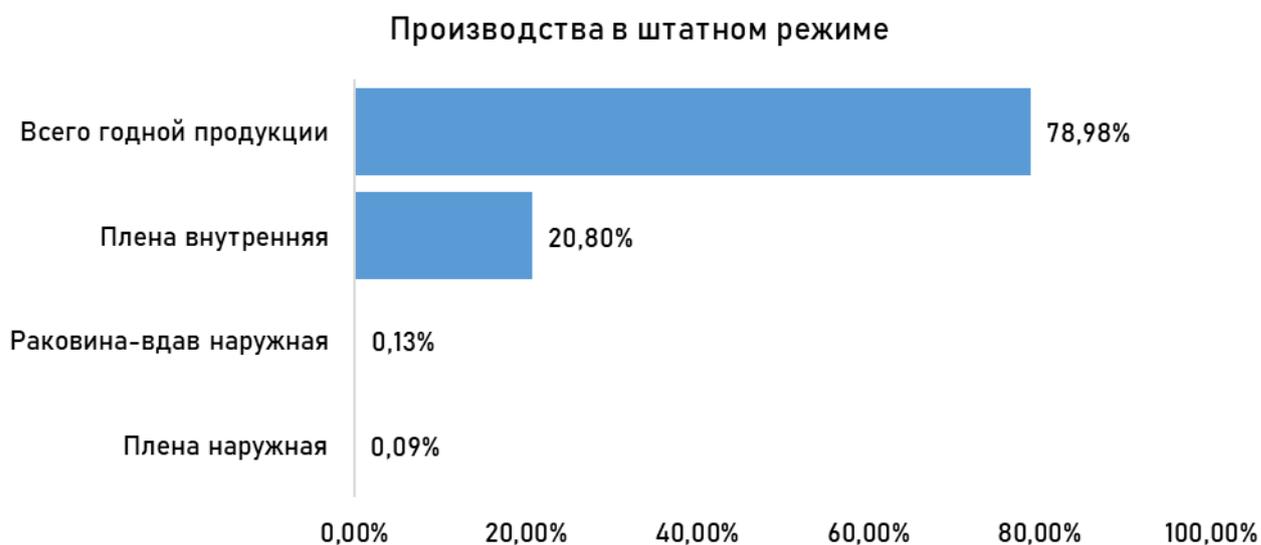


Рисунок 3.2 – Статистические данные по качеству труб при прокатке в штатном режиме работы

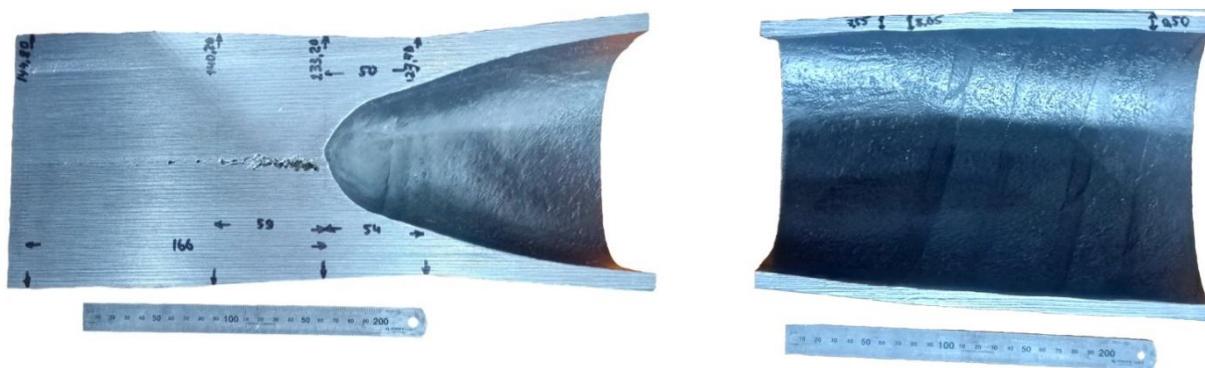


Рисунок 3.3 – «Заторможенная заготовка-гильза» для трубы размером Ø159×4,5 мм

При проведении опытной прокатки использовался технологический инструмент (рабочие валки, оправки и направляющие линейки), спроектированный с учётом результатов расчёта по программе «Eisen v2.0».

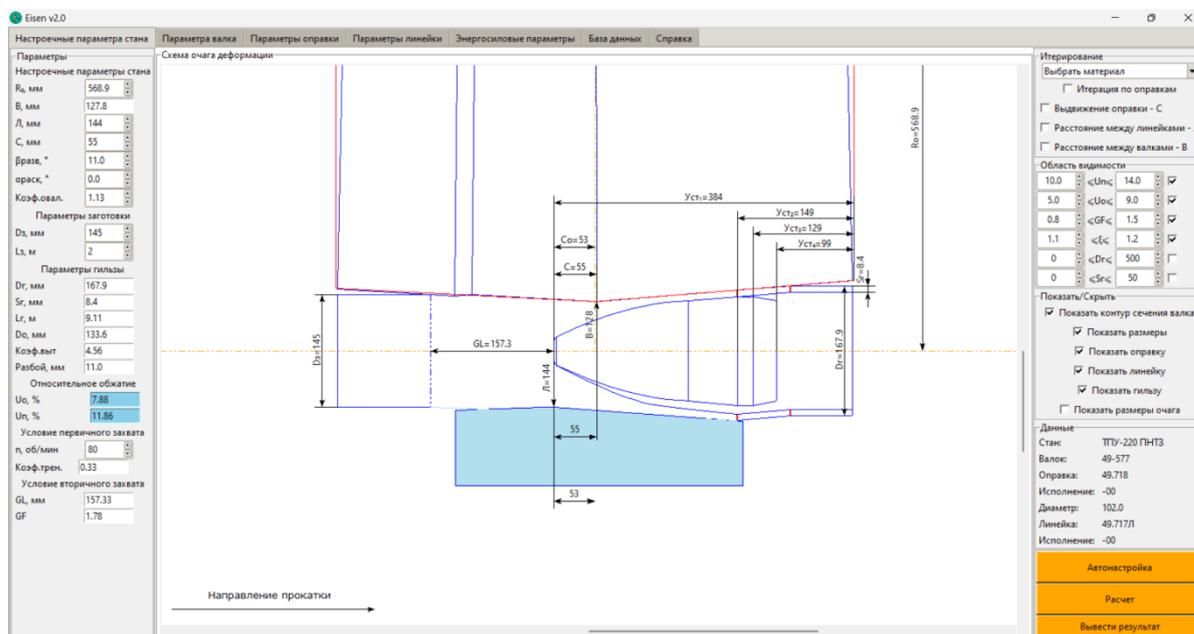


Рисунок 3.4 – Очаг деформации прошивного стана, построенный в программе «Eisen v2.0»

Результаты расчёта параметров настройки прошивного стана ТПА 220 для прокатки труб $\text{Ø}159 \times 4,5$ в компьютерной программе «Eisen v2.0» и показатели замера геометрии заторможенной заготовки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры очага деформации, полученные в результате расчета по программе, и результаты замера заторможенной заготовки

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
Торможенка	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

Примечание:

*GL – расстояние между сечениями первичного и вторичного захвата, мм

**GF – количество циклов перед носком оправки

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния геометрических параметров гильзы на процесс прокатки в автоматическом стане ТПА 220. Определены закономерности образования дефектов в виде продольных складок на концах черновых труб методом моделирования в среде «QForm». Установлено, что при определённой величине

обжатия по стенке трубы в первом проходе происходит сплющивание профиля трубы с образованием складки на её боковой поверхности, так называемого «плавника». Моделирование показало, что применение в действующей конструкции оправочного узла автомат-стана дополнительной втулки препятствует сплющиванию конца черновой трубы и тем самым минимизирует образование дефекта в виде «плавников» при заданной величине обжатия по стенке.

По результатам моделирования построена гистограмма величины относительного обжатия по стенке в первом проходе при прокатке черновых труб различного сортамента на автоматическом стане (рис. 4.1). Зелёная пунктирная линия показывает порог начала образования «плавников». При превышении значения относительного обжатия 30,0 % начинают образовываться концевые складки. Красная пунктирная линия указывает предел (39,4 %), при котором установка дополнительной втулки не предотвращает образования концевых продольных складок. Следовательно, для труб размером $\text{Ø}133\times 4,0$; $\text{Ø}159\times 4,5$; $\text{Ø}159\times 5,0$; $\text{Ø}168\times 5,0$ установка втулок не предотвращает образование концевых складок.

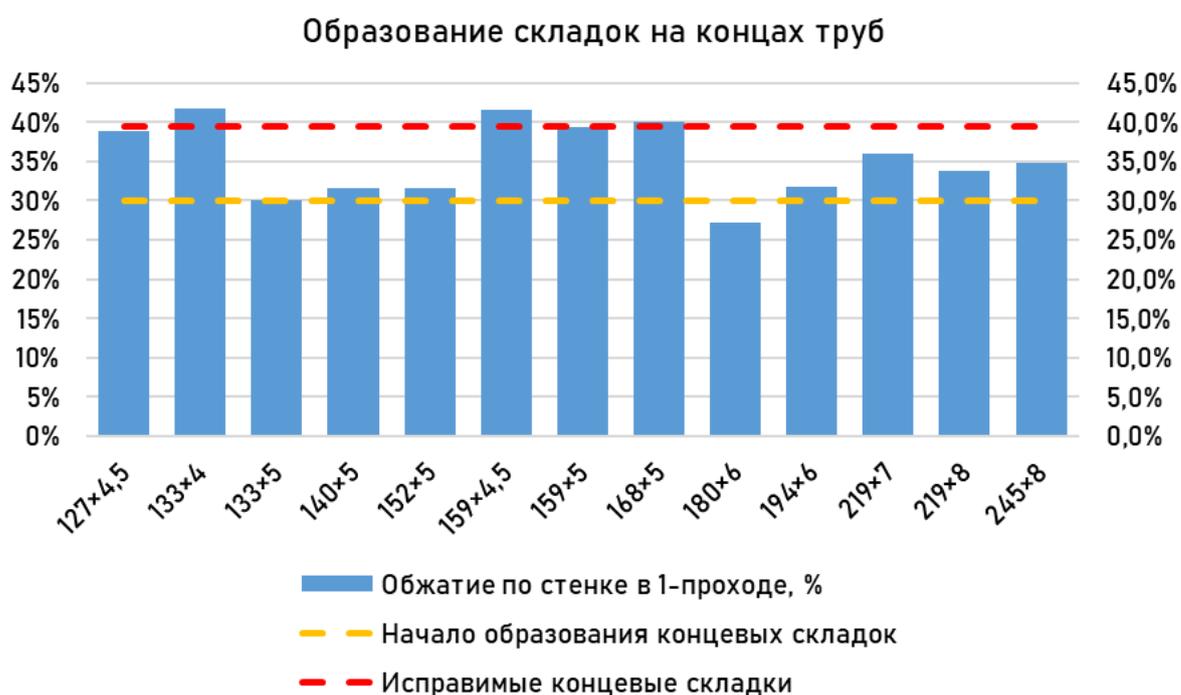
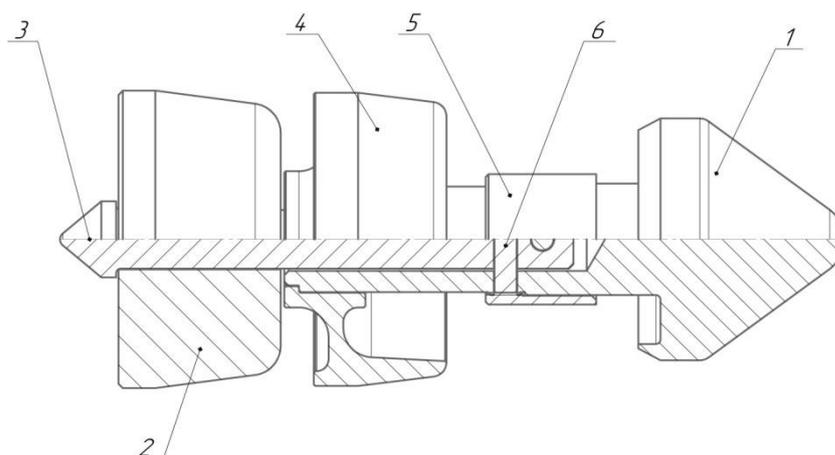


Рисунок 4.1– Гистограмма величины относительного обжатия по стенке в первом проходе для труб различного сортамента

Предложена новая конструкция оправочного узла автоматического стана с дополнительной втулкой, расположенной позади оправки, которая препятствует сплющиванию черновой трубы в конце прокатки и, таким образом, снижает образование продольных складок на концах труб.

На рисунке 4.2 показана новая конструкция оправки с дополнительной втулкой.



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

Рисунок 4.2 – Конструкция оправочного узла автоматического стана

Моделирование процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220 в среде «QForm» показало, что при относительном обжатии по стенке в первом проходе до 38,4% установка дополнительной втулки в конструкции оправки предотвращает образование дефектов в виде «плавников» на конце черновой трубы.

Пятая глава посвящена исследованию процесса раскатки труб на автоматическом стане ТПА 220 и прокатном стане ДУО-210. Результаты моделирования процесса раскатки в программе «QForm» показали, что размеры и количество дефектов на внутренней поверхности трубы существенно снижаются при прокатке с использованием цилиндрической оправки. В случае её применения значительно снижается сила трения между оправкой и трубой, что способствует значительному улучшению качества внутренней поверхности черновой трубы. Дополнительно улучшить состояние внутренней поверхности можно за счёт перемещения оправки по направлению прокатки. Новая калибровка рабочих валков на прошивном стане обеспечивает прокатку более тонкостенных гильз, что компенсирует снижение коэффициента вытяжки в автоматическом стане при использовании цилиндрической оправки.

Проведено моделирование процесса раскатки на автоматическом стане ТПА 220 с цилиндрической и конической оправкой. По результатам моделирования выполнен анализ геометрических параметров черновых труб. Моделирование процесса прокатки на автоматическом стане было проведено с одинаковыми размерами гильзы как для конических, так и для цилиндрических оправок на ТПА 220.

На основании сравнения значений отклонений по диаметру при использовании конических и цилиндрических оправок можно сделать следующие выводы:

1. В большинстве случаев трубы, прокатанные на цилиндрических оправках, имеют меньшие отклонения по диаметру и толщине стенки по сравнению с трубами, прокатанными на конических оправках. Например, для профиля $\text{Ø}127 \times 4,5$ отклонение по диаметру составляет 0,77 мм, а по толщине стенки – 0,27 мм при использовании цилиндрических оправок, тогда как при использовании конических коротких оправок отклонение по диаметру составляет 1,74 мм, а по толщине стенки – 0,47 мм.

2. Наружный диаметр и толщина стенки труб, прокатанных на цилиндрических оправках, более стабильны: диапазон отклонений по диаметру труб размером $\text{Ø}152 \times 5$ составляет 0,09 мм, по толщине стенки – 0,21 мм. У труб, прокатанных на конических оправках, отклонение по диаметру составляет 1,18 мм, по толщине стенки – 1,01 мм.

3. Наибольшие отклонения по толщине стенки труб при использовании цилиндрических оправок наблюдаются у труб размером $\text{Ø}219 \times 7$ (-0,77 мм), а при прокатке на конических оправках максимальное отклонение составляет 1,11 мм для размера $\text{Ø}180 \times 6$.

В целом прокатка на цилиндрических оправках сопровождается большей стабильностью при меньших отклонениях по диаметру, что объясняется более эффективным распределением обжатия по диаметру и по стенке по длине очага деформации. Тем не менее, результаты могут варьироваться в зависимости от конкретного профиля трубы, и выбор типа оправки должен основываться на требованиях к точности и допустимым отклонениям.

Результаты моделирования и расчёта энергосиловых параметров процесса прокатки на автомат-стане приведены на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Усилие прокатки на автоматическом стане ТПА 220 при использовании конических и цилиндрических оправок

Очевидно, что процесс раскатки труб в круглом калибре на цилиндрической оправке осуществляется при меньших усилиях. Так, например, при раскатке трубы $\text{Ø}159 \times 4,5$ разница в величине усилия составляет 154 кН, что составляет более 39%. Минимальное различие в усилиях зафиксировано при прокатке труб $\text{Ø}180 \times 6$, и оно составляет 22 кН, что связано с меньшей величиной обжатия по стенке при прокатке труб данного типоразмера.

Анализ полученных результатов показал, что прокатка на цилиндрической оправке обеспечивает более точные геометрические размеры труб по толщине стенки.

Адекватность моделирования была проверена путем экспериментальной прокатки на стане ДУО-210 НИТУ МИСиС. В качестве заготовок были выбраны трубы из Ст3 диаметром $\text{Ø}45$ мм с толщиной стенки 5 мм и длиной 200 мм, которые прокатывались в трубы диаметром $\text{Ø}42$ мм со стенкой 3,5 мм. В процессе исследования было прокатано 4 трубы с различными условиями трения между оправкой и трубой: без смазки и со смазкой на основе графита.

Фактические размеры диаметра труб после прокатки составили: без смазки – 42,7 мм, со смазкой – 42,5 мм. По результатам моделирования диаметр трубы при прокатке без смазки равнялся 42,04 мм, со смазкой – 41,97 мм. Таким образом, отклонение расчетных размеров от фактических составило менее 1,7%.

Измерения энергосиловых параметров при прокатке показали, что усилие металла на валок при прокатке без смазки достигало 115,5 кН, усилие на оправку – 61 кН. Применение смазки обеспечило снижение усилия на валок до 112 кН, а на оправку – до 20 кН. При моделировании прокатки в среде «QForm» получены следующие результаты: усилие на валок при прокатке без смазки составило 98,6 кН, на оправку – 63,5 кН. Наличие смазки на оправке привело к уменьшению усилия на валок до 94,5 кН, а на оправку – до 17,3 кН.

Таким образом, отклонение результатов расчета от величин, полученных при измерении параметров в ходе экспериментальной прокатки без смазки, для усилия на валок не превышает 15%, для усилия на оправку отклонение составило 4%. При прокатке со смазкой отклонение в значениях расчетного и фактического усилия на валок не превышает 16%, тогда как отклонение измеренного и расчетного значения усилия на оправку составило 13,5%.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточной точности моделирования процесса прокатки на цилиндрической оправке в среде «QForm».

На основании анализа результатов прокатки с использованием цилиндрических и конических оправок установлено следующее:

- прокатка на цилиндрической оправке обеспечивает более точные размеры труб по толщине стенки;

- усилия прокатки в первом проходе при использовании цилиндрических оправок на 27% меньше по сравнению с короткими коническими оправками.

Использование цилиндрических оправок способствует снижению усилий на оправку за счёт более равномерного распределения нагрузки, постоянного угла контакта, стабилизации положения оправки в очаге деформации и уменьшения сопротивления течению металла. Эти преимущества делают процесс прокатки более эффективным, а также снижают износ инструмента и энергозатраты.

Основные выводы и результаты работы

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 этой программы 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 НИТУ 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 публикация по теме диссертации

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Шербутаев Н. И., Государственная регистрация программы для ЭВМ. Название программы для ЭВМ: «Программа для расчета настроечных параметров прошивного стана при производстве горячекатаных бесшовных труб». RU2023663368.

6. 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.