

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи



Король Алексей Валентинович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДВУХВАЛКОВОЙ ВИНТОВОЙ ПРОШИВКИ НА  
ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ  
РЕШЕНИЙ

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор А.В. Выдрин

Челябинск 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Обзор научно-технической литературы по прошивке на двухвалковых станах винтовой прокатки.....	7
1.1 Особенности процесса винтовой прошивки .....	7
1.1.1 Технологические схемы винтовой прошивки и виды станов в зависимости от типа валков для их реализации .....	7
1.1.2 Условия заполнения очага деформации.....	9
1.1.3 Напряженно-деформированное состояние при двухвалковой винтовой прошивке и качество внутренней поверхности гильз.....	12
1.2 Точность геометрических размеров гильз .....	15
1.3 Стойкость оправок прошивных станов .....	18
1.4 Математическое описание двухвалковой винтовой прошивки .....	21
1.4.1 Существующие методики расчета настроечных параметров двухвалковых станов винтовой прокатки .....	21
1.4.2 Существующие методики по определению калибровки оправок и направляющих линеек.....	25
1.5 Выводы и постановка задач исследований .....	28
2 Теоретическое исследование двухвалковой винтовой прошивки.....	32
2.1 Компьютерное моделирование двухвалковой винтовой прошивки .....	32
2.2 Математическое моделирование двухвалковой винтовой прошивки.....	41
2.2.1 Определение математических зависимостей очага деформации при двухвалковой винтовой прошивке.....	41
2.2.2 Методика по определению настроечных параметров процесса двухвалковой винтовой прошивки .....	48
2.2.3 Математическая модель для проектирования линеек.....	55
2.2.4 Математическая модель для проектирования оправок при получении тонкостенных гильз .....	60
2.3 Применение теории решения оптимизационных задач.....	66
2.3.1 Оптимизация процесса двухвалковой винтовой прошивки.....	66

2.3.1.1 Критерий оптимизации и набор управляющих параметров для двухвалковой винтовой прошивки .....	66
2.3.1.2 Система ограничений процесса двухвалковой винтовой прошивки	71
2.3.1.3 Способ оптимизации двухвалковой винтовой прошивки и пример расчета.....	74
2.3.2 Оптимизация операции «передняя зацентровка» торца заготовки .....	77
2.3.2.1 Критерий оптимизации и набор управляющих параметров для операции «передняя зацентровка».....	77
2.3.2.2 Система ограничений для операции «передняя зацентровка» .....	79
2.3.2.3 Способ оптимизации операции «передняя зацентровка» и пример расчета.....	82
2.4 Выводы по второй главе .....	86
3 Исследование стойкости оправок прошивного стана и разработка технических решений по их повышению .....	87
3.1 Анализ стойкости оправок прошивного стана .....	87
3.2 Анализ факторов, влияющих на стойкость оправок.....	92
3.3 Новая форма рабочей поверхности оправки.....	99
3.4 Выводы по третьей главе .....	101
4 Испытания разработанных технических решений в промышленных условиях.....	102
4.1 Проведение опытной прокатки на АО «ВТЗ». ....	102
4.2 Проведение опытной прокатки на ПАО «СТЗ». ....	108
4.2.1 Разработка калибровки линеек.....	109
4.2.2 Разработка калибровки оправок.....	112
4.2.3 Проведение опытной прокатки .....	114
4.3 Выводы по четвертой главе .....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
Библиографический список.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	135

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной задачей для трубных заводов России является модернизация действующих и создание новых высокотехнологичных и высокопроизводительных трубопрокатных агрегатов [1-4]. При этом для производства труб с повышенными требованиями по точности и качеству на современных трубопрокатных агрегатах необходимо получать гильзы с жесткими требованиями по геометрической точности из непрерывнолитой заготовки круглого сечения [3, 5-15], значительно снижающей себестоимость бесшовных труб.

Операция прошивка на двухвалковых станах винтовой прокатки является наиболее перспективным способом получения гильз, так как точность гильзы при двухвалковой винтовой прошивке наилучшая по сравнению с другими известными способами [16].

Однако, в настоящее время при освоении технологии получения гильз (особенно тонкостенных) с относительно большим «подъемом» и «посадом» наружного диаметра (больше 10%) из непрерывнолитой заготовки относительно большего диаметра возникли (больше 260 мм) проблемы по проектированию прокатного инструмента прошивных станов. Это связано с тем, что в отечественной практике прошивку заготовок относительно большего развеса осуществляли на тихоходных станах винтовой прокатки, входящих в состав трубопрокатных агрегатов с пиллигримовым станом. Процесс прошивки происходил на малых углах подачи и служил для получения толстостенных гильз [17]. При получении гильз на скоростных станах винтовой прокатки происходит значительное падение стойкости прокатного инструмента, в первую очередь оправок прошивного стана, и увеличиваются погрешности формы гильз из-за значительного искажения очага деформации, высокой степени и скорости деформирования заготовки.

Помимо точности, достоинством операции винтовой прошивки на двухвалковых станах является высокая гибкость процесса, позволяющая

реализовывать различные схемы деформирования заготовки: с «посадом», «размер в размер» и «подъемом» наружного диаметра гильзы, что способствует унификации непрерывнолитой заготовки и увеличению производительности трубопрокатных агрегатов.

Гибкость двухвалковой винтовой прошивки обеспечивается благодаря тому, что в процессе деформирования заготовки и формирования гильзы участвует три типа прокатного инструмента прошивного стана (направляющие линейки, валки, оправки). Поэтому одна и та же гильза может быть получена при различном позиционировании прокатного инструмента прошивного стана.

Высокая гибкость двухвалковой винтовой прошивки и широкий диапазон изменения настроечных параметров станов вызывает определенные трудности в разработке технологии винтовой прокатки. Несмотря на то, что для каждого параметра винтовой прокатки на базе экспериментальных исследований и практического опыта трубопрокатных агрегатов разработаны рациональные области изменения, для создания новых технологий двухвалковой винтовой прошивки и определения их взаимодействия необходимы специальные методы математического моделирования: применение метода конечных элементов, который позволяет эффективно решать 3-х мерные задачи по моделированию напряженно-деформированного состояния, и использование математических методов, основанных на теории решения оптимизационных задач.

В связи с этим (для обеспечения высокого качества, производительности и снижения себестоимости труб) целью диссертационной работы является совершенствование процесса двухвалковой винтовой прошивки, основанное на моделировании и разработке новых технических решений, обеспечивающих повышение точности гильз; уменьшение дефектов на поверхностях гильз; увеличение производительности прошивных станов; повышение стойкости оправок прошивных станов.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующей научно-технической литературы по прошивке на двухвалковых станах винтовой прокатки.
2. Для описания более полной картины напряженно-деформированного состояния заготовки при винтовой прошивке провести компьютерное моделирование процесса и определить влияние на напряженно-деформированное состояние заготовки технологических параметров.
3. Разработать математическую модель процесса прошивки, учитывающую искажение очага деформации в зависимости от угла подачи и раскатки, позволяющую определить настроечные параметры двухвалковых прошивных станов.
4. Разработать математические модели для проектирования оправок и линеек, необходимых для получения тонкостенных гильз и обеспечивающие высокую точность геометрических параметров гильз.
5. Решить оптимизационные задачи операций «винтовая прошивка» и «зацентровка».
6. Провести исследования по стойкости оправок прошивного стана и определить значимые факторы, оказывающие влияние на износ.
7. Разработать технические решения по увеличению стойкости оправок прошивного стана.
8. Выполнить промышленное опробование полученных новых технических решений.

# 1 Обзор научно-технической литературы по прошивке на двухвалковых станах винтовой прокатки

## 1.1 Особенности процесса винтовой прошивки

### 1.1.1 Технологические схемы винтовой прошивки и виды станов в зависимости от типа валков для их реализации

На прошивных станах винтовой прокатки рациональными технологическими схемами деформирования катаной заготовки или отливаемой в слиток являются схемы, в которых диаметр заготовки примерно равен диаметру гильзы (технологическая схема, в практике трубного производства часто называемая «размер в размер»). При получении тонкостенных гильз применяется заготовка с диаметром на 5 – 10% меньше диаметра гильзы (схема на «подъем»), а при получении толстостенных гильз ( $D_z/S_z = 3,5-7$ ) на 5 – 10% больше диаметра гильзы (схема на «посад») [17].

С применением непрерывнолитой заготовки и необходимостью в ее унификации (из-за ограниченного ряда кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок), а также с увеличением производительности трубопрокатных агрегатов существуют исключения из практики: величина «посада» или «подъема» наружного диаметра гильзы на различных прошивных станах выше 10 % [18-30].

В настоящее время схемы двухвалковой винтовой прошивки реализуются на станах с бочковидными, грибовидными и чашевидными валками.

Наиболее распространенными и универсальными являются прошивные станы с бочковидными валками, на которых прошивают гильзы в широком диапазоне геометрических размеров по стенке и наружному диаметру [24-26].

Более благоприятная схема на «подъем» наружного диаметра гильзы реализуется на станах с грибовидными валками при получении тонкостенных

гильз [29]. При получении толстостенных гильз ухудшается качества наружной поверхности гильзы по причине развития тангенциальных растягивающих напряжений, способствующих увеличению пластического изгиба в поверхностных слоях заготовки из-за овализации поперечного сечения полого тела и скручивания. [29, 30]. Кроме того, достаточно высокий «подъем» наружного диаметра гильзы ограничивается длиной валка и необходимостью увеличения выходного угла конусности очага деформации в конусе раскатки, а это способствует увеличению энергосиловых параметров процесса прошивки.

Ведение процесса прошивки с относительно глубоким «посадом» наружного диаметра гильзы является наименее приемлемым для прошивных станков с грибовидными валками [30]. Процесс прошивки с относительно глубоким «посадом», особенно тонкостенных гильз, характеризуются рядом негативных явлений: увеличением энергосиловых параметров процесса, образованием осевых разрушений в заготовке, повышенным износом прокатного инструмента, в первую очередь неподвижных линеек, и как следствие, ухудшением качества поверхности гильз. Указанные недостатки процесса связаны с повышенной деформацией в конусе прошивки очага деформации (конус раскатки служит для калибрования толщины стенки гильзы). Для реализации данной схемы необходима разработка специальной калибровки прокатного инструмента – создание во входном конусе очага деформации схемы, позволяющей осуществлять основную деформацию заготовки с обеспечением благоприятных условий для первичного и вторичного захвата; уменьшению выходного конуса очага деформации в плоскости валков, способствующего ограничению роста наружного диаметра гильзы [19, 20, 27, 28].

Для случая прошивки с уменьшением диаметра гильзы наиболее подходящими являются прошивные станы с валками чашевидного типа, обеспечивающие максимально-возможное уменьшение диаметра гильз, а также проработку литой структуры [21-23].



### 1.1.2 Условия заполнения очага деформации

Период заполнения очага деформации состоит из условия первичного и вторичного захвата заготовки. Первыми условиям захвата заготовки при двухвалковой винтовой прошивке занимались Е. Зибель [31], П. Т. Емельяненко и А.А. Шевченко [32]. Условиями захвата при винтовой прокатке также уделяли внимание И.Л. Перлин, С.И. Борисов, А.Я. Крейнс, А.З. Глейберг, С.В. Богуславский, Ю.М. Матвеев, И.А. Фомичев и др.

П.К. Тетериным достаточно полно проведен теоретический анализ условиям первичного и вторичного захвата [33]. Первичный захват включает в себя условия вращения заготовки и последующего осевого втягивания заготовки и зависит от коэффициента трения на валках, угла конусности валков на входном участке, угла подачи, отношения диаметра заготовки к диаметру валка. Из теоретического анализа П.К. Тетерина следует, что с уменьшением угла конусности валков и отношения диаметра заготовки к диаметру валков условия первичного захвата улучшаются. Увеличение угла подачи способствует улучшению осевого втягивания заготовки, однако ухудшает условия вращения заготовки.

Уменьшение диаметра заготовки вступает в противоречие с реальностью: в связи с увеличением производительности в современных трубопрокатных агрегатах диаметр используемых заготовок увеличивается.

Оптимальное значение углов входного конуса валка в соответствии с рекомендациями Ф.А. Данилова, А.З. Глейберга и В.Г. Балакина [17] находится в пределах  $\alpha_g = 2^{\circ}45' - 3^{\circ}30'$ . Однако в практике трубного производства встречаются валки с меньшими углами входного конуса ( $\alpha_g = 1^{\circ} - 2^{\circ}30'$ ). Это характерно для ступенчатых калибровок валков, впервые предложенных А.А. Шевченко и Г.А. Пищиковым [34]. В тоже время в работе В.В. Швейкина и Л.Н. Карпенко [35] было показано, что ступенчатая калибровка не имеет преимуществ перед обычной калибровкой и служит только лишь для улучшения захвата и уменьшения длины очага деформации в конусе прошивки. С другой стороны, в своих трудах Ю.М. Матвеев и Я.Л. Ваткин [36] 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 валка с повышенной конусностью, при которой нормальный захват нарушается.

При увеличении коэффициента трения на валках условия захвата улучшаются. Поэтому валки изготавливают с механической обработкой входного конуса, а также с применением электроискрового легирования [37] (нанесение «шипов» - «ежиков» на полном или локальном участке входного конуса валка).

При рассмотрении условий вторичного захвата П.К. Тетериным получено выражение для определения минимального обжатия заготовки перед носком оправки, при котором осуществляется преодоление лобового сопротивления оправки осевому продвижению металла в очаге деформации. В данном выражении не учитывается влияние направляющего инструмента, так как рассмотрены условия только встречи переднего торца заготовки с оправкой, при котором заготовка практически не соприкасается с направляющим инструментом. В работе [38] А.В. Выдриным рассмотрено влияние направляющих приводных дисков Дишера на условия вторичного захвата. В результате подвода дополнительной энергии в очаг деформации со стороны дисков происходит улучшение вторичного захвата. На базе методики П.К. Тетерина А.В. Выдриным получено математическое выражение для минимального обжатия перед носком оправки, в котором учитывается влияние приводных дисков.

Помимо минимального обжатия перед носком оправки японские исследователи используют дополнительный критерий ведения устойчивого процесса прошивки [39-41], представляющий собой отношение длины очага деформации от захвата заготовки валками до встречи с носком оправки к диаметру заготовки, и данное отношение должно быть выше 0,4. Подобный подход также реализован в трудах Р.М. Голубчика и его коллег из Московского энергетического института (МЭИ) [42-47]. Но данный критерий ведения устойчивого вторичного захвата не учитывает влияние угла подачи. От угла подачи зависит величина шага подачи заготовки за ее оборот и, по мнению Ю.М.

Матвеева [36], длина очага деформации от захвата валками до торца носка оправки должна равняться как минимум полушагу подачи заготовки за ее оборот. Немецкие исследователи ввели параметр GF, характеризующий устойчивость вторичного захвата [48], который представляет собой отношение длины очага деформации от захвата заготовки валками до встречи с носком оправки к шагу подачи заготовки за ее полный оборот и данное отношение должно быть больше 0,8.

Большинство технических решений по совершенствованию прошивки на двухвалковых станах основаны на улучшении вторичного захвата. Наиболее подробно теоретически и экспериментально исследованы процессы прошивки с осевым подпором заготовки [33, 49, 50, 51], с принудительным вращением (торможением) оправки в очаге деформации [49, 52, 53], с применением специальных калибровок валков с ленточными нарезками [50, 54, 55, 56]. Улучшение условий вторичного захвата достигается в перечисленных способах различными путями: внесением в очаг деформации дополнительных внешних осевых подпирающих усилий; изменением направления сил трения на контактной поверхности металла с оправкой; увеличением осевой тянущей способности валков за счет использования ленточной нарезки.

Следует отметить, что практическая реализация многих из перечисленных технических разработок связана с рядом технических и технологических трудностей. Так, основную сложность при выполнении надежного промышленного образца механизма осевого подпора составляет высокая скорость вращения заготовки. Для механизма принудительного вращения оправки - отсутствие надежной конструкции механизма оперативного соединения и отсоединения привода с оправкой. Поэтому упомянутые всесторонне исследованные и перспективные технические разработки не получили практического внедрения. Ограниченное применение получила прошивка с использованием калибровок валков с ленточной нарезкой. Несмотря на то, что эксплуатация валков с нарезкой и дает некоторое увеличение осевой скорости, однако, как показала практика, валки с нарезкой можно использовать лишь при

получении толстостенных гильз большого диаметра на тихоходных прошивных станах устаревших конструкций.

### 1.1.3 Напряженно-деформированное состояние при двухвалковой винтовой прошивке и качество внутренней поверхности гильз

Из практики трубопрокатного производства известно, что одним из недостатков процесса винтовой двухвалковой прошивки является распространенные и практически неустраняемые внутренние дефекты на гильзах – плены и трещины. Прокатное происхождение дефектов связано с центральным разрушением металла в период заполнения очага деформации.

На базе анализа напряженно-деформированного состояния исследователи [31, 33, 57-78] пытались объяснить специфику двухвалковой винтовой прокатки – образование полости в центральной зоне заготовки. Существуют различные мнения о схеме напряжений, действующих по сечению заготовки, преимущественном влиянии радиальных или осевых растягивающих напряжений на развитие разрушений. Но все исследователи сходятся в том, что разрушение заготовки происходит от действия растягивающих напряжений и ему предшествует пластическая деформация.

Результаты многочисленных экспериментов по осадке заготовок круглого сечения с координатными сетками выявили проникновение пластической деформации в центральную зону заготовки уже при обжатии 1,0-1,5 % и интенсивное ее увеличение с дальнейшим ростом обжатия [69-74]. Наличие пластической деформации в осевой зоне заготовок установлено также посредством исследования макро и микроструктур деформированных образцов [31, 33, 49, 78], замером твердости и плотности металла различных участков поперечного сечения заготовки [75, 76], с помощью показаний тензодатчиков, впаянных в осевую зону заготовки [77], и поляризационно-оптического метода исследования [66].

На базе многочисленных экспериментов, проводимых в промышленных и в лабораторных условиях, ряд исследователей выдвинули в качестве критерия (ведения процесса винтовой прошивки без образования полости в центральной зоне заготовки) суммарное обжатие заготовки перед носком оправки, которое находится в пределах 4 – 10%. На непрерывнолитых заготовках из-за центральной пористости разрушение осевой зоны может происходить и при обжатии 3 % [21].

Поскольку процесс винтовой прокатки циклический, то помимо суммарного обжатия перед носком оправки важным фактором является количество циклов в очаге деформации. То есть схема напряженно-деформированного состояния реализуется взаимодействием технологических факторов циклического процесса: величиной частного обжатия и количеством циклов деформаций. Несмотря на то, что эти факторы взаимосвязаны, имеется достаточное количество исследований, освещающих роль каждого из них в образовании разрушения по отдельности [33, 44, 47, 49, 50, 77, 79]. Считается бесспорным, что снижение цикличности и увеличения частного обжатия способствуют повышению суммарного обжатия перед носком оправки. Главным фактором, влияющим на цикличность процесса, является угол подачи. В работе [49] показано, что увеличение угла подачи до  $20^{\circ}$  полностью исключает центральное разрушение даже при относительно больших обжатиях перед носком оправки, так как при повышенном угле подачи снижается не только цикличность процесса, но и увеличивается частное обжатие.

Я.С. Финкельштейном разработана теория [79], основанная на малоциклового усталости, в которой показано влияние на осевое разрушение количество циклов и величины частного обжатия. При этом количество циклов до разрушения находилось экспериментально через анализ винтовой линии на недокатах, заторможенных в стане.

На качество внутренней поверхности значительное влияние оказывает коэффициент овализации. Установлено [78], что увеличение коэффициента овализации приводит к росту внутренних дефектов. При повышенной овализации за счет развития и накопления внеконтактной поперечной деформации, особенно на тонкостенных гильзах, происходит усиление интенсивности деформации

осевой зоны, что способствует снижению величины критического обжатия и более раннему вскрытию полости. В технической литературе [49] при прошивке заготовок на станах винтовой прокатки с направляющими неподвижными линейками минимальный коэффициент овализации находится в пределах 1,05-1,10. При меньшем значении коэффициента овализации возникает значительное сопротивление процессу прошивки как в осевом, так и в тангенциальном направлениях, что способствует снижению осевой скорости металла и может привести к прекращению процесса.

В работах [37, 49, 80] приведены результаты исследований о влиянии вида направляющего инструмента прошивного стана на осевое разрушение заготовки: приводные диски (диски Дишера); неподвижные линейки, ролики. В этих работах отмечается, что наилучшая схема деформирования с позиции центрального разрушения наблюдается с использованием приводных дисков, а наихудшая - в случае применения роликов. Это связано с тем, что ролики способствуют тангенциальному истечению металла, а, следовательно, и увеличению поперечной деформации и овальности гильзы. Диски Дишера увеличивают осевую составляющую скорости металла и способствуют увеличению продольной деформации металла, приводящей к снижению цикличности процесса. Однако, диски имеют ограничения по прошиваемой заготовке: их диаметр должен быть как минимум в 9 – 10 раз больше, чем диаметр заготовки [29].

В работах [17, 50, 57, 58] отмечено, что наличие оправки в очаге деформации увеличивает критическое обжатие заготовки за счет подпирающих сил трения с ее стороны, которые резко уменьшают осевые растягивающие напряжения в центральной зоне заготовки и, тем самым, уменьшают или заваривают вскрытие осевой зоны металла. По мнению А. З. Глейберга [17] влияние оправки двояко. С одной стороны, происходит уменьшение осевых растягивающих напряжений в центральной зоне, с другой – оправка вызывает повышенное скольжение металла в очаге деформации, что ведет к уменьшению частных обжатий и увеличению цикличности процесса, а, следовательно, и к центральному разрушению. К тому

же, значительное выдвигание оправки может ухудшить условия вторичного захвата и возможен закат оправки в конце процесса прошивки [26, 37].

## 1.2 Точность геометрических размеров гильз

Из всех типов прошивки (прессование, пресс-валковая прошивка, сверление) двухвалковая винтовая прошивка обладает преимуществом в отношении точности гильз. Это связано со спецификой напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, способствующей самоцентрированию оправки в очаге деформации [37].

Вопросами точности гильз и труб занимались М.Ф. Столетний и Е.Д Клемперт [16]. В своей работе на базе многочисленных исследований авторы объясняют причину образования поперечной разностенности. При винтовой прокатке толщина стенки гильзы по образующим изменяется неравномерно и характер этого изменения приближается к некоторой периодически изменяющейся кривой, напоминающей синусоиду.

Появление разностенности при прошивке гильз объясняется сложным движением оправки в очаге деформации под действием на нее возмущений со стороны деформируемого металла и стержня. Отклонение носка оправки относительно оси заготовки в момент соприкосновения с заготовкой и определяют в итоге толщину стенки гильзы [16].

Все факторы, влияющие на точность гильз, М.Ф. Столетний и Е.Д Клемперт делят на две группы:

- 1) технологические факторы;
- 2) факторы, связанные с конструкцией прошивного стана.

К технологическим факторам, влияющим на положение оправки в очаге деформации, а, следовательно, и на разностенность гильз, нужно отнести качество торцов заготовки, зацентровка ее торцов, нагрев заготовки, настройка прошивного стана, калибровка прокатного инструмента прошивного стана.

Влияние нагрева заготовки перед прошивкой освещено в работах [16, 33, 81]. Из которых следует что, неравномерный и несимметричный нагрев заготовки повышает поперечную разностенность гильзы.

Для уменьшения продольной разностенности в трудах [82-84] предлагают уменьшать разницу температуры по длине гильзы. Уменьшение разницы температур достигается:

–за счет спрейерного охлаждения ее с нарастающей интенсивностью в процессе прошивки непосредственно за рабочей клетью прошивного стана [82];

–прошивка и последующая прокатка гильзы с переменной толщиной стенки [83];

–уменьшение разницы температуры, благодаря рациональному скоростному режиму прошивки (увеличением угла подачи и частоты вращения валков [84]).

В работах [57, 66, 85, 86] исследовано влияние зацентровки на точность гильз и труб. Авторы указывают на необходимость зацентровки, особенно при прошивке толстостенных гильз. При прошивке тонкостенных гильз можно без ущерба точности зацентровку переднего конца не использовать при условии ведения процесса с повышенными обжатиями перед носком оправки и в пережиме валков.

Вместе с тем при прошивке зацентрованных заготовок часто наблюдаются дефекты, связанные с самой зацентровкой. Причина образования таких дефектов – несоответствие профиля центровочного отверстия, искаженного в результате образования «утяжины», профилю носка оправки [50, 87].

В практике экспериментальных исследований подобный вид дефекта встречался при проведении прошивки заготовок с глубокой зацентровкой переднего торца (которая выполнялась в виде цилиндрического отверстия на переднем торце заготовки с целью улучшения условий вторичного захвата). Характерной особенностью прошивки таких заготовок было получение на внутренней поверхности гильз грубой концевой «плены» [87]. Особенность механизма деформирования заготовки с глубокой зацентровкой (при несоответствии профиля центровочного отверстия профилю носка оправки)



состоит в осаживании «набегающего» объема металла заготовки конусной рабочей частью оправки со смещением в пространстве между доньшком центрального отверстия и торцом оправки с последующей раскаткой в кольцо, а затем и плену.

Большое влияние на разностенность гильз оказывает группа технологических факторов, связанных с настройкой прошивного стана и калибровкой инструмента. Изменение углов подачи в широком интервале существенно отражается на разностенности гильз, что объясняется возникающей при этом не параллельностью образующих раскатного конуса валков и калибрующего участка оправки [16]. Кроме этого в работе [49] показано, что увеличение угла подачи вызывает некоторый рост кривизны поперечного сечения «заготовки – гильзы».

Важным технологическим параметром, ответственным за точность получаемых гильз, является коэффициент овализации. При меньшем развитии поперечной деформации у заготовки-гильзы уменьшается ее овальность и увеличивается точность как по наружному диаметру гильзы, так и по толщине стенки. Поэтому процесс прошивки предлагают вести при наименьшем коэффициенте овализации и при более тесном калибре по линейкам [88], особенно при получении тонкостенных гильз. В работе [88] также предлагается уменьшать овальность «заготовки-гильзы» применением валков прошивного стана максимального диаметра с минимальным углом выходного конуса валка  $\alpha_b = 1^\circ$  и переносить деформацию раскатки гильзы в выходной конус.

К основным факторам, связанным с конструкцией прошивного стана, относятся точное центрирование заготовки, соосность оси стержня и оси прошивки, достаточная жесткость стержня (колебательная система «стержень – оправка»). Влиянию устойчивости стержня с оправкой во время прошивки в литературе уделено большое внимание [16, 49, 80, 89-91]. В работах [89, 91] подробно исследован процесс колебания стержня, определена форма и собственная частота колебаний и на основании этого проведены исследования по устойчивости стержней в станах винтовой прокатки.

### 1.3 Стойкость оправок прошивных станов

Стойкость оправок прошивного стана, как и любого инструмента горячего деформирования, зависит от большого количества факторов: химического состава материала и режима термообработки оправок, калибровки прокатного инструмента, марок прошиваемых сталей, режима нагрева заготовок, условия охлаждения оправки [92].

К наиболее характерным видам износа прошивных оправок относятся: местная выработка, истирание, задиры и вырывы металла из тела оправки, пластическая деформация носка и рабочей поверхности, трещины в виде сетки разгара, зональные трещины, оплавление рабочей поверхности, налипание металла заготовки на поверхность оправки [92, 93].

В работе [92] отмечено, что решающее влияние на стойкость оправок оказывает уровень удельных усилий на контактной поверхности, температурные условия работы, а также циклический характер работы.

По мнению авторов работы [94], наиболее частой причиной выхода из строя оправок является пластическая деформация, которая получает свое развитие после достижения удельными усилиями предела текучести материала оправки на контактной поверхности. Для анализа различных факторов, влияющих на стойкость оправок, авторы ввели критерий, равный отношению интенсивности суммарных напряжений на поверхности оправки к пределу текучести материала оправки на контактной поверхности. На базе расчетов по данному критерию были проведены исследования и установлено, что наибольшее влияние на стойкость оправок оказывают: угол подачи, температура нагрева заготовки, обжатие перед носком оправки, коэффициент трения на контактной поверхности металла с оправкой.

С увеличением обжатия заготовки перед носком оправки происходит увеличение удельных усилий на ее контактной поверхности и склонность оправки к износу пластической деформации возрастает. Но в работе отмечено, что также

при высоком обжатии перед носком оправки уменьшаются термические напряжения и время прошивки.

Также неоднозначно влияние угла подачи: с одной стороны увеличения угла подачи ужесточает условия работы носка оправки и ее рабочей поверхности, с другой стороны с увеличением угла подачи уменьшается машинное время прошивки, а, следовательно, и разогрев оправки [93].

Силовыми и тепловыми условиями работы оправки занимались на опытно – промышленном стане МИСиС – 130Д [93, 95]. В качестве технологических факторов, влияющих на стойкость оправки, исследовались: угол подачи, коэффициент оваллизации, обжатие в пережиме валков, обжатие перед носком оправки. Из исследований следует:

– увеличение угла подачи приводит к росту усилия по всей длине оправки и объясняется это увеличением частного обжатия и изменением напряженно-деформированного состояния в центральной зоне заготовки;

– увеличение коэффициента оваллизации приводит к снижению усилия на оправку по причинам уменьшения ширины контактной поверхности по оправке и уменьшения подпирающего действия со стороны направляющих линеек;

– увеличение обжатия в пережиме валков и перед носком оправки увеличивают усилия на оправку по причине роста степени деформации металла заготовки.

На стойкость оправок оказывает влияние длина и форма рабочей поверхности. Из многочисленных исследований, проведенных П.Т. Емельяненко, И.А. Фомичевым, П.Т. Тетериным, С.И. Орловым, В.С. Смирновым, В.В. Швейкиным [32, 33, 57, 59, 96, 97] и др., известно, что на более длинных оправках износ распространяется более равномерно, чем на коротких.

Однако, в работах [26, 96] показано, что на достаточно длинных оправках наблюдается склонность к закату заднего конца гильзы на оправку и нестабильное окончание процесса прошивки.

На стойкость оправки влияет и форма ее рабочей поверхности. В практике трубного производства применяются сферические и конические оправки. В

работе [96] определено, что оптимальный угол наклона образующий конической оправки, составляет  $\alpha_{op} = 12^{\circ} - 15^{\circ}$ . Однако, в настоящее время нет единого мнения по форме оправки, но широкое распространение получили сферические оправки.

Известны оправки, у которых образующая описывается по заранее заданному закону (для равномерного распределения действующих усилий на оправку во время прошивки): из условия постоянства вытяжек и постоянства частного обжатия [33]; постоянство относительных обжатий стенки [97]; по равенству относительной деформации по толщине стенки до и после пережима [57]; на основе заданных законов распределения коэффициентов обжатия, вытяжек и уширения [59].

На практике оправки, спроектированные по заданному закону, не получили широкого распространения из-за малой гибкости в перенастройке прошивного стана.

Для повышения стойкости оправок также используют водоохлаждение: внутреннее и внешнее охлаждение. При внешнем охлаждении стойкость оправок значительно повышается [17]. Оправки с внутренним водоохлаждением используются в основном на малых ТПА. На средних и больших ТПА с пиллигримовыми станами данные оправки не получили широкого распространения.

## 1.4 Математическое описание двухвалковой винтовой прошивки

### 1.4.1 Существующие методики расчета настроечных параметров двухвалковых станов винтовой прокатки

Определение настроечных параметров процесса прошивки является сложной комплексной задачей, в которой необходимо учитывать несколько взаимозависимых параметров: расстояние между валками в их пережиме, выдвижение оправки за пережим валков, расстояние между линейками, угол подачи, угол раскатки.

Для нахождения параметров настройки прошивного стана необходимо точно описать геометрические параметры очага деформации в любом поперечном сечении. Данная задача легко решается без учета разворота валков на угол подачи [17] и применительно для работы прошивных станов на небольших углах подачи (до 6 градусов).

При ведении процесса прошивки на больших углах подачи пренебрегать искажением очага деформации из-за угла подачи недопустимо. При больших углах подачи фактическое расстояние между оправкой и валком в сечении формирования стенки гильзы больше, что приводит к получению более толстостенной гильзы, и обжатие перед носком оправки может быть меньше минимально допустимой величины, рассчитанной из условия вторичного захвата. Кроме изменения фактического расстояния уменьшается и длина очага деформации – особенно важная характеристика процесса при определении условий вторичного захвата.

Поэтому при работе станов винтовой прокатки на повышенных углах подачи необходимо учитывать искажение очага деформации, вызванное разворотом валков на угол подачи и угол раскатки. Существует достаточно много работ по определению геометрических параметров очага деформации при прошивке

[33, 49, 50, 57, 80, 98-101], касающиеся определения кратчайшего расстояния между валками.

С точки зрения постановки задачи наиболее полной является работа П.К. Тетерина [33], однако в ней допущена ошибка, так как зазор между валками определяется как удвоенное расстояние от оси заготовки до поверхности валка. Кроме того, вывод формулы для определения зазора между валками привел к уравнению 4-й степени, а метод для его решения автор не приводит.

В работе Ю.М. Миронова [98] исследована схема стана любой конструкции, для которой автор определяет точным методом, но конечный результат, так же как и у П.К. Тетерина, получается после решения системы трех уравнений с тремя неизвестными, что приводит к уравнению 4-й степени, решение которого для валка произвольной формы затруднительно. Это побудило автора в этой же работе привести более упрощенные выражения. Однако, эти выражения тоже достаточно сложны и автор принял ряд допущений, упрощающих вид конечных выражений и уменьшающих точность расчетов.

И.А. Фомичев [57] в своих трудах также приходит к решению уравнений четвертой степени, но у него допускается неточность, которая состоит в том, что за угол раскатки принимается не угол, образуемый осью валка с плоскостью, нормальной к оси поворота, а угол, который образуется в плоскости чертежа между осью прокатки и проекцией оси валка на данную плоскость. Чтобы уйти от уравнения 4-й степени он делает ряд допущений, которые при относительно большем угле подачи приводят к существенным погрешностям, особенно при определении длины очага деформации.

В работах Р.М. Голубчика, М.В. Чепурина и Д.В. Меркулова рассмотрены [99] геометрические зависимости очага деформации при винтовой прокатке с позиции «скрещивающихся прямых» и показана возможность определения параметров циклического формоизменения в каждом цикле деформирования для прошивных станов различного типа. Однако, при определении величины выдвигания оправки образующую поверхность валка заменяют прямой, что при больших углах подачи приводит к снижению точности расчета.

При выводе формул по определению кратчайшего расстояния между валками А.П. Чекмарев и В.И. Биба [50] используют ряд допущений. В работе они получили достаточно простые выражения, но при этом предлагается расчет геометрии станов только с бочковидными валками и не приводится оценка погрешности.

В работе [49] также получены достаточно простые выражения для описания геометрических параметров процесса прошивки на грибовидных валках, но авторы сами указывают на достаточно высокую погрешность вычислений при повышенных углах подачи. Используя за структурный вид полученные выражения, авторы путем варьирования кратчайшего расстояния между валками в зависимости от углов подачи и раскатки и применения метода наименьших квадратов получили выражения для практических расчетов. Недостатком данной работы является то, что получено выражение для одноконусного очага деформации и не рассматривается кратчайшее расстояние в зоне сопряжения участков с различной конусностью.

В статье Ю.Г. Гуляева, Е.И. Шифрина и др. [100] получены достаточно простые выражения для определения геометрических зависимостей очага деформации при прошивке на грибовидных валках. При этом точность расчетных данных по сравнению с другими методиками составляет 5-15%.

В работе [80] описываются геометрические зависимости очага деформации винтовой прокатки для многоконусных очагов деформации. Но в данной работе рассматривается определение только кратчайшего расстояния между валками и решение достигается за счет дополнительных итерационных операций.

Таким образом, существующие математические модели по геометрическим зависимостям очага деформации, учитывающие искажения из-за разворота валков на угол подачи при точной постановке задачи приводят или к сложным громоздким выражениям и уравнениям 4-го порядка, решение которых достигается различными итерационными способами или вносятся допущения, способствующие снижению точности расчета. При этом сходимость

итерационного процесса во многом зависит от удачного выбора начального приближения и в противном случае может привести к ложным результатам.

Во многих работах фактическая погрешность вычислений не приводится.

В результате создания САД программ, например, КОМПАС-3D и Solid Works, основные геометрические зависимости [10] в очаге деформации находятся при помощи твердотельного моделирования, основанного на поверхностном моделировании с граничным представлением твердых тел. Данный подход является наиболее точным, но для его реализации необходимы навыки работы в САД программах.

При создании очага деформации трехмерное отображение элементов заменяется изображением в двумерном пространстве. В двумерном пространстве определяется местоположение оправки, линейки и другие технологические параметры.

Для необходимого формирования наружного диаметра гильзы кроме расстояния между валками необходимо знать положение направляющего инструмента. Расстояние между линейками и валками характеризует соотношение осей эллипсообразного сечения заготовки (коэффициент овализации), то есть определяют величину развития поперечной деформации при винтовой прошивке, характеризующую овальностью заготовок.

В работе [17] на основе экспериментальных данных при прошивке углеродистых и низколегированных марок сталей рекомендуют эмпирическую формулу для определения расстояния между линейками. Данное выражение получено путем экспериментального подбора расстояния между линейками в сечении пережима валков при различном обжатии в пережиме валков и при различных значениях «подъема» или «посада» наружного диаметра гильзы.

В работе [102] для проектирования линеек и настройки прошивного стана предлагается коэффициент овализации задавать в качестве исходной величины. Даны рекомендации по выбору коэффициента овализации в зависимости от схемы деформирования: 1,06 – 1,08 – для «посада» наружного диаметра гильзы; 1,08 –



1,14 – для ведения процесса прошивки «размер в размер»; 1,14 – 1,18 – для «подъема» наружного диаметра гильзы.

Расстояние между линейками в работе [36] определяют при условии, что контакт линейки с «заготовкой – гильзой» заканчивается в поперечном сечении очага деформации, где и прекращается контакт «заготовки – гильзы» с оправкой. При этом считается, что дальнейшая деформация происходит практически без изменения вытяжки и связана с выравниванием наружного диаметра гильзы. Для нахождения площади поперечного сечения, где заканчивается контакт с линейкой и оправкой, используют допущения: поперечное сечение очага деформации представляет собой эллиптическое кольцо, ограниченное наружным и внутренним эллипсами, с равномерной толщиной стенки. В результате расстояние между линейками находится из условия, что наружный диаметр гильзы, равен полусумме двух осей в сечении, где заканчивается формирование толщины стенки. Но в практике трубного производства расчеты по данному подходу дают значительные отклонения (особенно при получении тонкостенных гильз), так как не учитывается калибровка прокатного инструмента прошивного стана и схема деформирования заготовки. При получении тонкостенных гильз происходит смещение сечения схода гильзы с оправки и с линейки.

Известны попытки определения сечения схода металла с поверхности линейки [103]. В данной работе описаны изменения овальности «заготовки – гильзы» вдоль длины очага деформации и определены граничные точки контакта «заготовки-гильзы» с линейками. Недостатком в методике является допущение о равенстве внешней и внутренней овальности «заготовки – гильзы».

#### 1.4.2 Существующие методики по определению калибровки оправок и направляющих линеек

Основные требования к калибровке оправок и линеек были сформулированы П.Т. Емельяненко [32] и И.А. Фомичевым [57]: для оправок – получение заданных геометрических параметров гильзы и правильное распределение величин

деформации вдоль очага деформации, получение высокой стойкости оправок, минимальный расход энергии прошивки; для направляющих линеек: плотное прилегание линеек к поверхности валков; условия свободного входа в очаг деформации заготовки и выхода гильзы из валков, создания условий нормальной овализации прошиваемой заготовки вдоль очага деформации.

В работе [36] рассмотрено несколько подходов к калибровке прокатного инструмента прошивного стана. В первом подходе калибровка оправок и линеек определяется на базе калибровки валков. Второй основывается на принятом законе формоизменения заготовки и последующем проектировании калибровки инструмента прошивного стана.

В.С. Смирнов в своих трудах [58, 59] весь прокатный инструмент рассматривает как единый комплекс, воздействующий на прокатываемый металл. Недостаток работы В.С. Смирнова заключается в том, что автор задавался достаточно произвольными условиями деформации.

Основными геометрическими параметрами оправки является ее диаметр и длина. Длину оправки определяют из следующих условий: обеспечения стабильного вторичного захвата заготовки, получения гильз с качественной внутренней поверхностью, обеспечения геометрических параметров гильз [17, 32, 57]. В работе [17] предложена методика по определению длины оправки. Недостатки этой методики заключаются в том, что не учитывается разворот валков на угол подачи и условия вторичного захвата рассматриваются только с позиции обжатия перед носком оправки. В статье [104] при разработке длины оправки учитывают угол подачи. Но этот учет для конкретного прошивного стана и математические выражения получены на основе аппроксимации границы очага деформации по валку.

Важным параметром оправки является ее максимальный диаметр. От значения диаметра оправки зависят все геометрические размеры гильзы, особенно ее внутренний диаметр. Для определения диаметра оправки необходимо знать величину раздачи внутреннего диаметра гильзы, в технической литературе называемый «разбой» [36]. Существует достаточно много формул по

определению «разбоя» [32, 104, 36, 48, 17]. Данные выражения получены на основе экспериментальных данных и математической обработки табелей прокатки. Как показала практика, при получении тонкостенных гильз из заготовки диаметром выше 250 мм данные выражения не корректны.

Достаточно полно методика проектирования направляющих линеек при двухвалковой винтовой прошивке изложена в работе И. А. Фомичева [57]. Как отмечено выше, при разработке калибровки линеек необходимо соблюдать условие плотного прилегания линеек к поверхностям валков.

Плотное прилегание линеек к поверхности валков обеспечивает закрытость калибра во всех поперечных сечениях очага деформации. В случае не закрытости очага деформации при получении тонкостенных гильз высока вероятность образования зажима заднего конца гильзы [17, 90] из-за интенсивного развития поперечной деформации, особенно на оправочном участке очага деформации.

В настоящее время задача по точному математическому описанию границы боковой поверхности валков с направляющей линейкой рассмотрена в работах И.А. Фомичева и П.К. Тетерина [33, 57]. Неточность этих подходов аналогичны недостаткам, представленным в пункте 1.4.1.

Важное значение при проектировании линеек имеет форма и размеры рабочей поверхности линейки: должно обеспечиваться условия свободного скольжения поверхности линейки и непрерывного изгиба выходящей из валков стенки гильзы. В практике трубного производства форму рабочей поверхности выполняют трех видов:

1 – по кривой, описывающей логарифмическую спираль, соответствующей формоизменению металла при винтовой прокатке [57, 78, 105, 106];

2 – выполнение рабочей поверхности, образованной двумя радиусами, которые приближенно описывают логарифмическую спираль [17];

3 – форма рабочей поверхности, образованная одним радиусом [17, 57].

Из-за простоты изготовления широкое распространение в практике получили линейки, выполненные по третьему способу. Исходными данными для проектирования однорадиусной формы линейки является ее ширина и глубина,

причем глубина выбирается исходя из опыта прошивки на конкретном прошивном стане, но есть общие рекомендации, которые также основаны на практике. В работе [37] глубину желоба выполняют, как  $\frac{1}{10}$  от диаметра заготовки. Ф.А.Данилов [17] дает численное значение глубины желоба линейки  $c = 7 \dots 30$  мм. Большие значения относятся к линейкам, применяемым для прокатки труб наибольшего диаметра из сортамента заготовок трубопрокатных агрегатов с автомат – станом (230 мм).

### 1.5 Выводы и постановка задач исследований

Изучение и анализ научно – технической литературы по винтовой двухвалковой прошивке позволил сделать следующие выводы:

1. С освоением непрерывнолитой заготовки круглого сечения на двухвалковых станах винтовой прокатки применяются технологические схемы, значительно отличающиеся от процесса прошивки катаной заготовки (величина «подъема» и «посада» наружного диаметра гильзы больше 10%) и реализуются на станах с различным типом валков. Высокая степень «подъема» или «посада» наружного диаметра гильз вынуждает вести процесс прошивки при критических (максимально возможных в плане условий захвата, образования дефектов, точности) параметрах процесса. Технологическая схема на «подъем» наружного диаметра характеризуется высоким коэффициентом овализации, что оказывает влияние на точность гильз, особенно при получении тонкостенных, где происходит интенсивное развитие поперечной деформации. При «посаде» наружного диаметра гильзы обжатие перед носком оправки и в пережиме валков может достигать высоких значений, что непременно сказывается в отрицательную сторону на качество внутренней поверхности гильз.

2. Условия первичного захвата для катаной заготовки всесторонне изучены и проблемы первичного захвата в практике трубного производства решены за счет разработки специальных калибровок валков с приданием определенной шероховатости, которая увеличивает коэффициент трения на контактной

поверхности валков с прошиваемым металлом заготовки. При использовании непрерывнолитой заготовки относительно большего диаметра и ведения процесса при повышенном угле подачи происходит значительное искажение очага деформации в зоне первичного захвата по причине значительной отдаленности места встречи заготовки с валками от их оси поворота на угол подачи. В результате первичный захват заготовки осуществляется при увеличенном угле конусности очага деформации в основной меридиональной плоскости заготовки, что приводит к повышению лобового сопротивления со стороны валков.

3. Для улучшения условий вторичного захвата все технические решения в настоящее время из-за технологических трудностей не реализованы (кроме применения двухвалковых станов винтовой прокатки с направляющими приводными дисками Дишера). На практике условия вторичного захвата улучшают за счет изменения позиционирования прокатного инструмента прошивного стана и разработки специальной калибровки, а мерой рациональности процесса служат обжатие перед носком оправки и расстояние от захвата заготовки валками до торца оправки. Из-за специфики напряженно-деформированного состояния заготовки при двухвалковой винтовой прошивке данные характеристики процесса оказывают значительное влияние на качество поверхностей гильз и на их точность. С одной стороны, увеличение угла подачи приводит к интенсификации процесса и уменьшается цикличность, что оказывает положительное влияние на качество внутренней поверхности. С другой стороны, при развороте валков на угол подачи уменьшается длина очага деформации до носка оправки и в совокупности с увеличенным шагом подачи заготовки ухудшаются условия вторичного захвата.

4. При двухвалковой винтовой прошивке в центральной зоне заготовки под действием растягивающих напряжений происходит разрушение центральной зоны заготовки. Многочисленные качественные исследования двухвалковой винтовой прошивки позволили выявить основные факторы, влияющие на центральное разрушение заготовки: угол подачи, коэффициент овализации, тип направляющего инструмента, позиционирование оправки в очаге деформации,

обжатие перед носком оправки. В связи со сложностью процесса винтовой прошивки существуют различные мнения о природе образования растягивающих напряжений в центральной зоне заготовки.

5. Увеличение точности гильз в настоящее время достигается несколькими направлениями: подготовка заготовки перед прошивкой (нагрев заготовки, зацентровка, рациональная порезка штанг и т.д.); создание устойчивой системы удержания оправки в очаге деформации. При применении зацентровки необходимо учитывать технологию прошивки заготовки, так как неправильная зацентровка может являться источником дефектов на внутренней поверхности гильз.

6. В практике и теории трубного производства вопросами точности гильз рассматривали с позиции изменения калибровки валков и оправок, настроечных параметров. Но влияние каждого из параметров технологии прошивки (элемент калибровки прокатного инструмента или какой-либо настроечный параметр) исследовался по отдельности, либо во взаимосвязи с другими для конкретного прошивного стана.

7. Стойкость оправок прошивного стана является актуальной темой и данному вопросу посвящено много исследований. На стойкость оправок влияет большое количество факторов: материал оправки, их термическая обработка, калибровка оправок, настройка прошивного стана, режим и условия водоохлаждения и т.д.

8. Существующие математические модели для определения геометрических зависимостей очага деформации, учитывающие искажения из-за разворота валков на угол подачи и угол раскатки при точной постановке задачи приводят или к сложным громоздким выражениям и уравнениям 4-го порядка, решение которых достигается различными итерационными способами или вносятся допущения, способствующие снижению точности расчета.

9. Основная сложность при разработке калибровки оправок для прошивки тонкостенных гильз заключается в определении ее наибольшего диаметра или «разбоя». Существующие выражения по определению величины «разбоя»

получены на основе экспериментальных данных и при обработке табелей прокаток прошивки заготовок диаметром до 250 мм.

10. Существующие методики по разработке направляющих линеек применимы для прошивки тонкостенных гильз малого диаметра и пригодны при работе прошивного стана в составе трубокатного агрегата, работающего с автомат – станом или малого ТПА с непрерывным станом.

На основе выполненного анализа поставлены следующие задачи исследования:

1. Для описания более полной картины напряженно-деформированного состояния заготовки при винтовой прошивке провести компьютерное моделирование процесса и определить влияние на напряженно-деформированное состояние заготовки технологических параметров.
2. Разработать математическую модель процесса прошивки, учитывающую искажение очага деформации в зависимости от угла подачи и раскатки, позволяющую определить настроечные параметры двухвалковых прошивных станков.
3. Разработать математические модели для проектирования оправок и линеек, необходимых для получения тонкостенных гильз и обеспечивающие высокую точность геометрических параметров гильз.
4. Решить оптимизационные задачи операций «винтовая прошивка» и «зацентровка».
5. Провести исследования по стойкости оправок прошивного стана и определить значимые факторы, оказывающие влияние на износ.
6. Разработать технические решения по увеличению стойкости оправок прошивного стана.
7. Выполнить промышленное опробование полученных новых технических решений.

## 2 Теоретическое исследование двухвалковой винтовой прошивки

### 2.1 Компьютерное моделирование двухвалковой винтовой прошивки

Как отмечено в пункте 1.1.3 из-за сложности процесса прошивки на двухвалковых станах винтовой прокатки существуют различные мнения о схеме напряжений, действующих по сечению заготовки.

Для исследования характера изменения напряжений в осевой зоне заготовки было проведено компьютерное моделирование процесса винтовой прокатки [107,108]. Моделирование осуществлялось с применением программы QForm 3D, основанной на методе конечных элементов (рисунок 1).

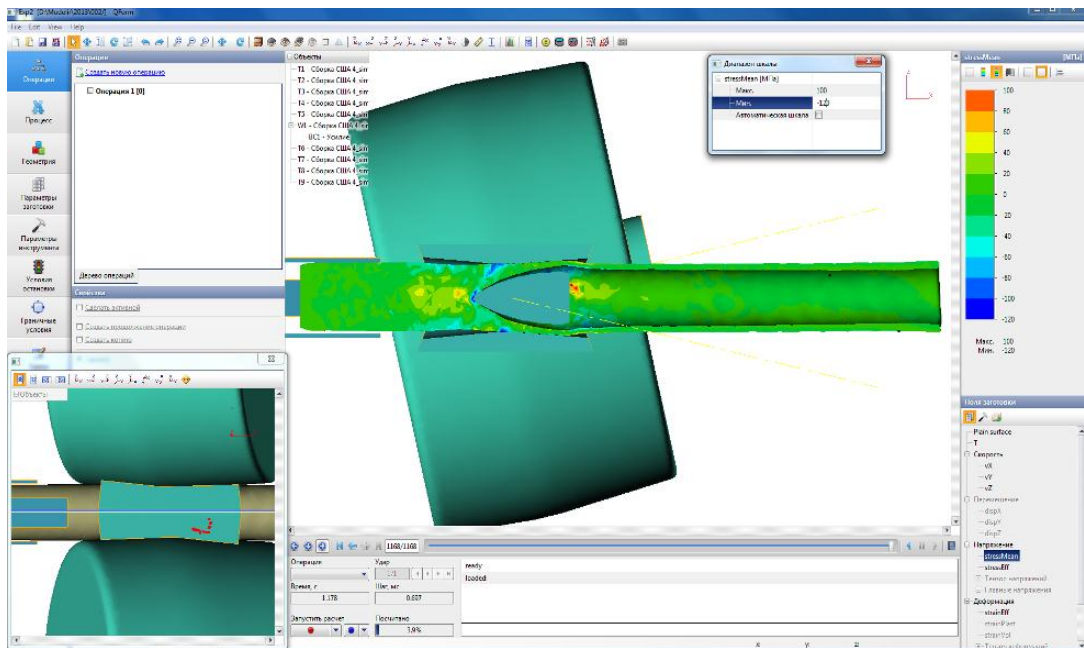


Рисунок 1 – Продольный разрез очага деформации процесса двухвалковой винтовой прошивки с направляющими линейками.

На рисунке 2 представлен характер изменения осевых растягивающих напряжений заготовки в ее центральной зоне.



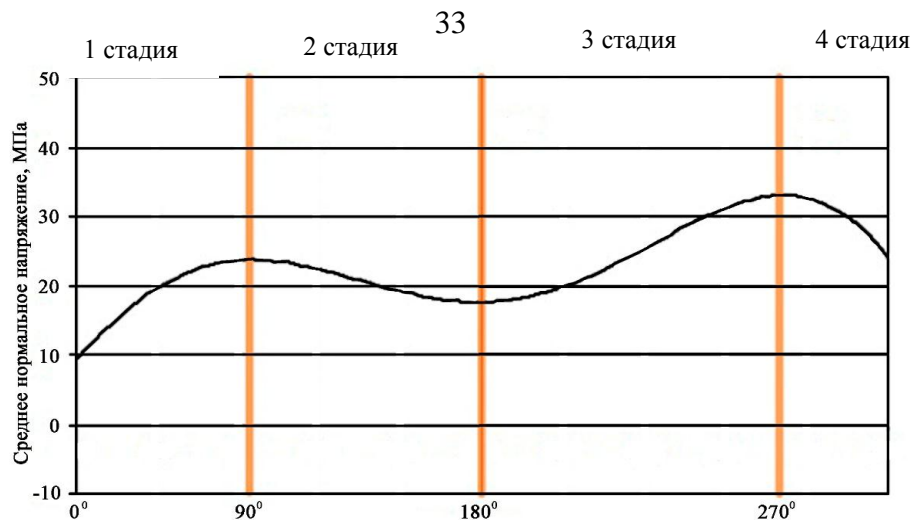


Рисунок 2 – Осевые растягивающие напряжения в центре заготовки при винтовой прокатке

Для анализа изменения напряженно-деформированного состояния металла заготовки при винтовой прокатке за один полный оборот целесообразно процесс разбить на четыре стадии:

1) в момент контакта заготовки с валком усилия, действующие на нее со стороны инструмента, имеют сосредоточенный характер и сжимающие напряжения малы (Рисунок 3).

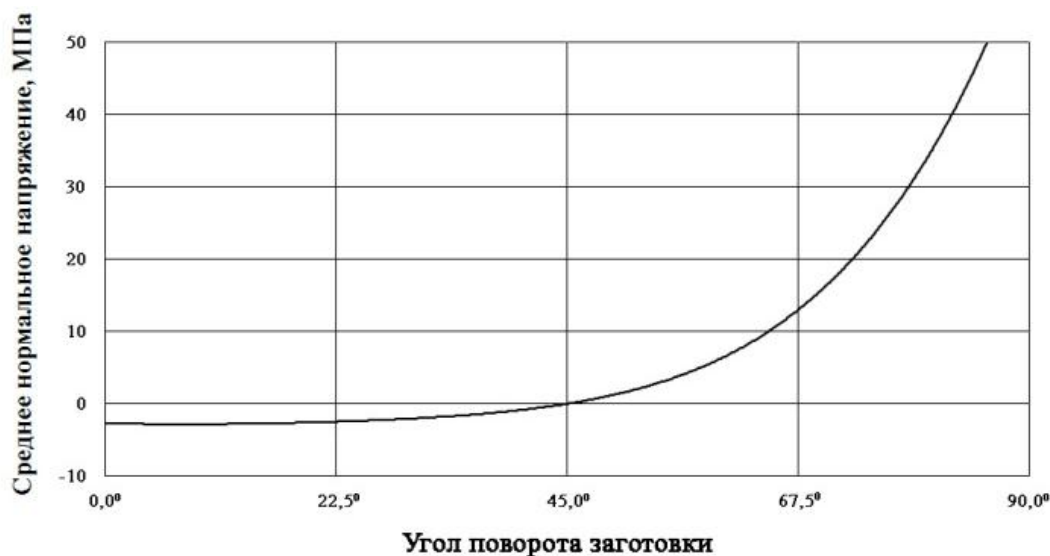


Рисунок 3 – Среднее нормальные напряжения на поверхностных слоях заготовки в первой стадии процесса

Поэтому сжимающие напряжения в период контакта заготовки с валками не доходят до центральной зоны. При последующем деформировании заготовки в зонах, не контактирующих с валками, возникают растягивающие напряжения, что способствует появлению растягивающих напряжений в центральной зоне заготовки. Максимальное значение реакционных растягивающих напряжений достигается за  $\frac{1}{4}$  оборота заготовки;

2)  $\frac{1}{4}$  -  $\frac{1}{2}$  оборота заготовки. Растягивающие напряжения на поверхностных слоях заготовки снижаются и возникают сжимающие из-за действия валков на соседний набегающий объем металла (Рисунок 4).

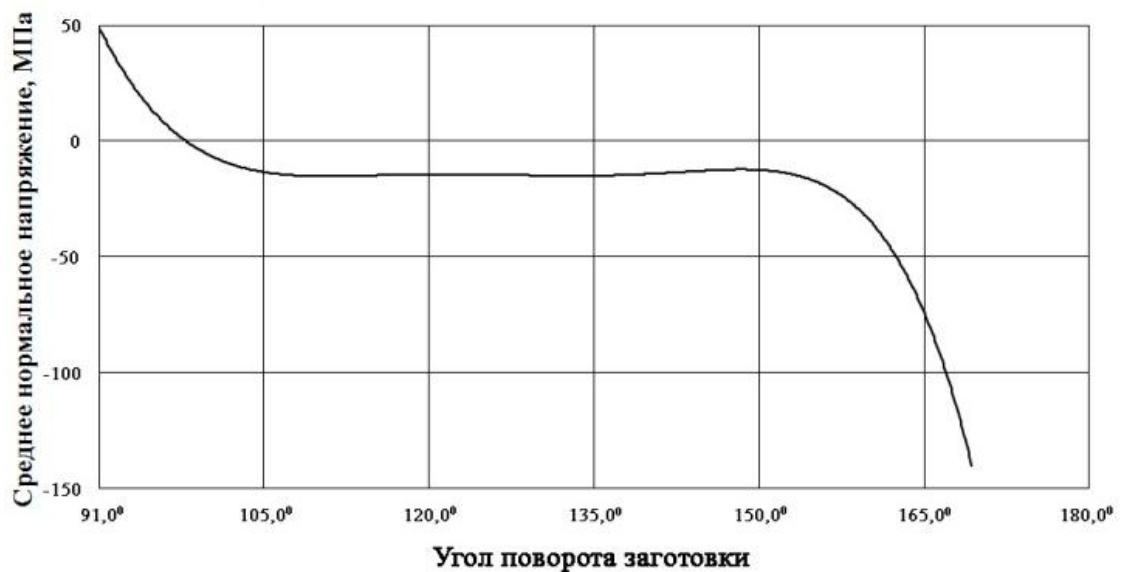


Рисунок 4 – Среднее нормальные напряжение на поверхностных слоях заготовки во второй стадии процесса

В момент совершения заготовкой  $\frac{1}{2}$  оборота валки вновь воздействуют на заготовку, и сжимающие напряжения на поверхностных слоях резко растут, что способствует уменьшению растягивающих напряжений в ее центральной зоне заготовки;

3)  $\frac{1}{2}$  -  $\frac{3}{4}$  оборота заготовки. На поверхностных слоях заготовки наблюдается уменьшение сжимающих напряжений (рисунок 5) и интенсивный рост реакционных растягивающих.

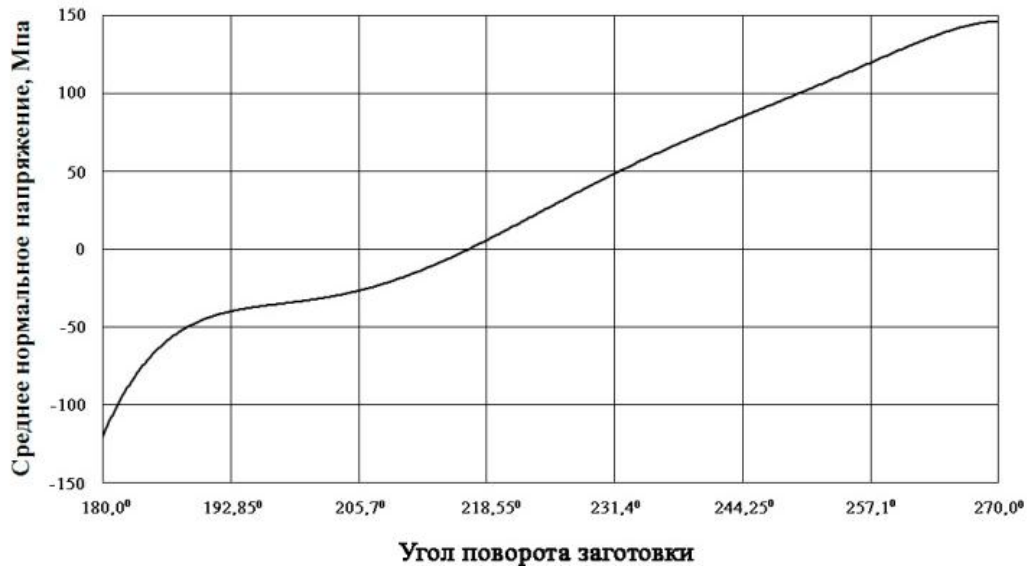


Рисунок 5 – Среднее нормальные напряжение на поверхностных слоях заготовки в третьей стадии процесса

В результате в центральной зоне заготовки происходит рост растягивающихся напряжений. Максимальное значение растягивающих напряжений достигается за  $\frac{3}{4}$  оборота заготовки;

4)  $\frac{3}{4}$  - 1 оборот. Происходит уменьшение растягивающих напряжений к концу цикла деформации и переход их в сжимающие напряжения вследствие контакта с валками, что способствует уменьшению нормальных растягивающих напряжений в центральной зоне заготовки.

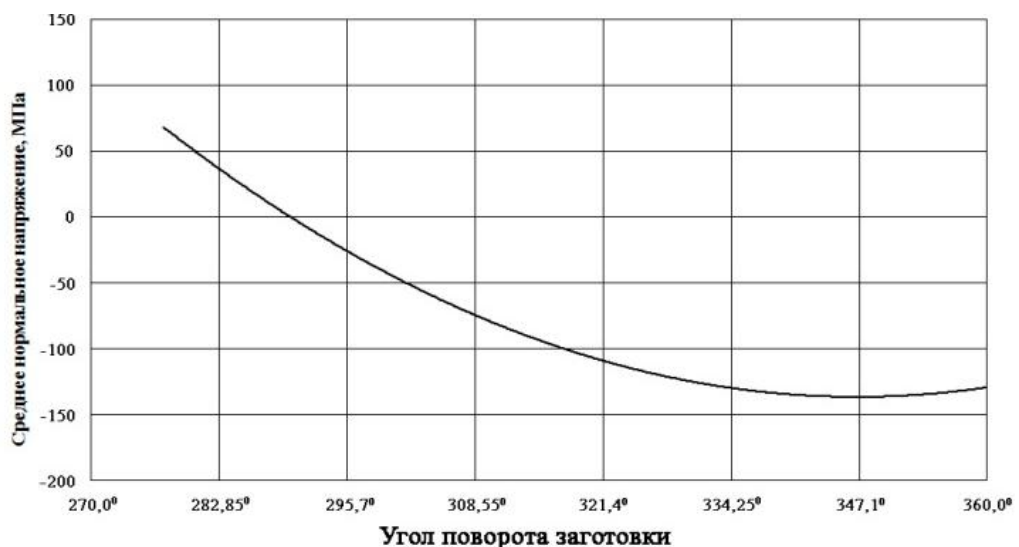


Рисунок 6 – Среднее нормальные напряжение на поверхностных слоях заготовки в четвертой стадии процесса

С каждым последующим оборотом заготовки значение экстремумов напряжения в центральной зоне заготовки возрастают вследствие роста усилия со стороны валков из-за увеличения ширины контактной поверхности и внеконтактной деформации. Величина внеконтактной деформации возрастает более интенсивно, что приводит к превалированию радиальных растягивающихся напряжений в центральной зоне заготовки и появлению дополнительных осевых растягивающих напряжений, вследствие чего материал центральной зоны заготовки подвергается объемной схеме всестороннего растяжения, благодаря которой и происходит разрушение металла.

В главе 1.1.3 отмечено, что наличие подпирющих сил со стороны оправки резко уменьшает осевые растягивающие напряжения в центральной зоне заготовки в очаге деформации, что способствует увеличению прошиваемости заготовки и уменьшает или «заваривает» вскрытие осевой зоны металла (Рисунок 7).

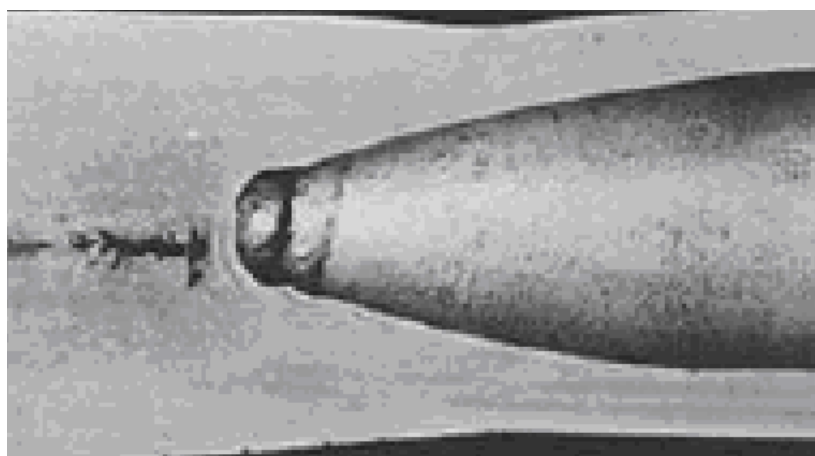


Рисунок 7 – «Заваривание» полости в осевой зоне заготовки

На рисунке 8 показано изменение средних нормальных напряжений в центральной зоне заготовки вдоль очага деформации от начала захвата до момента ее встречи с торцом оправки.

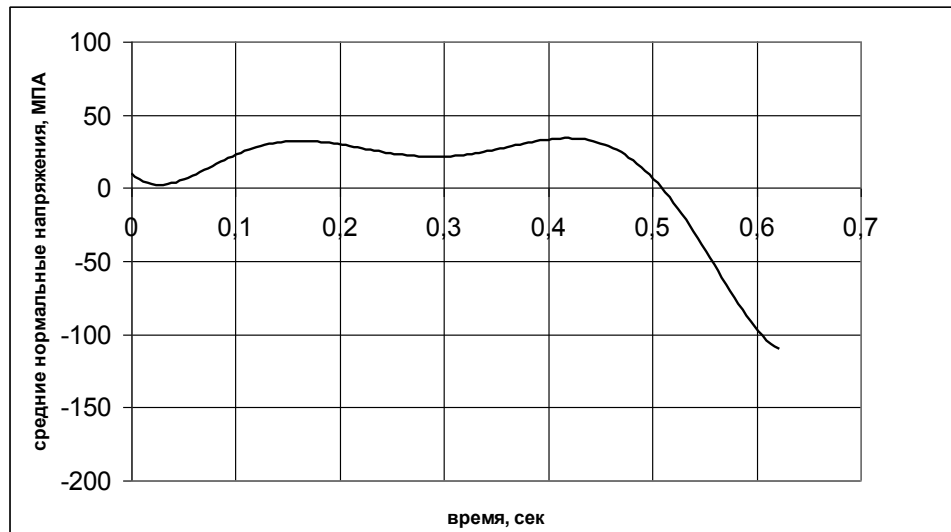


Рисунок 8 – Средние нормальные напряжения в осевой зоне при наличии оправки в очаге деформации

Для определения влияния угла подачи на процесс прошивки было проведено моделирование при различных углах подачи: ( $\beta=15^\circ, 13^\circ, 11^\circ, 9^\circ$ ). При этом настройка стана осуществлялась таким образом, чтобы заготовка сделала один полный оборот до встречи с оправкой. На рисунке 9 показано изменение средних нормальных напряжений в центральной зоне заготовки вдоль очага деформации от захвата до встречи заготовки с торцом оправки.

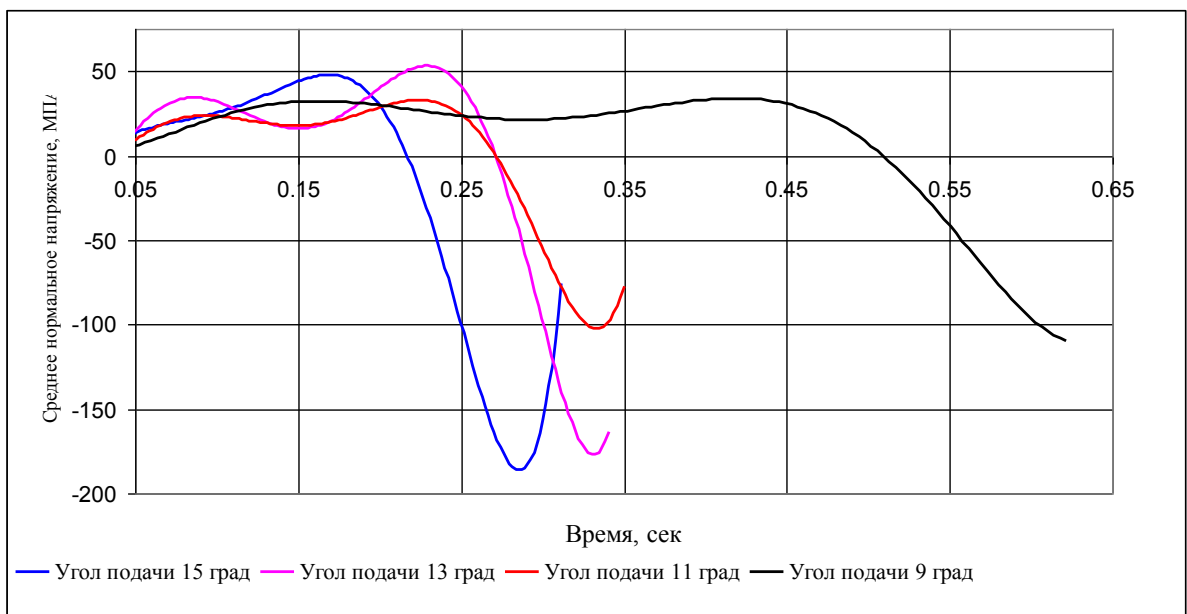


Рисунок 9 – Изменение среднего нормального напряжения в середине заготовки при прошивке на различных углах подачи

Видно, что с увеличением угла подачи растягивающие напряжения увеличиваются. Это связано с повышением частного обжатия за счет увеличения шага осевой подачи. Выше отмечено, что перед торцом оправки возникают сжимающие напряжения за счет действия подпирающих усилий со стороны оправки. С увеличением угла подачи сжимающие напряжения увеличиваются, что способствует «залечиванию» осевого разрушения центральной зоны заготовки. Поскольку при повышении угла подачи растягивающие напряжения в центральной зоне растут, необходимо процесс прошивки вести при условии, чтобы заготовка делала меньше одного оборота до встречи с торцом оправки, но не меньше  $\frac{3}{4}$  оборота, иначе возникнут проблемы со вторичным захватом.

С увеличением угла подачи увеличивается энергоемкость процесса прошивки. На рисунке 10 представлены результаты моделирования влияния угла подачи на величину крутящего момента.

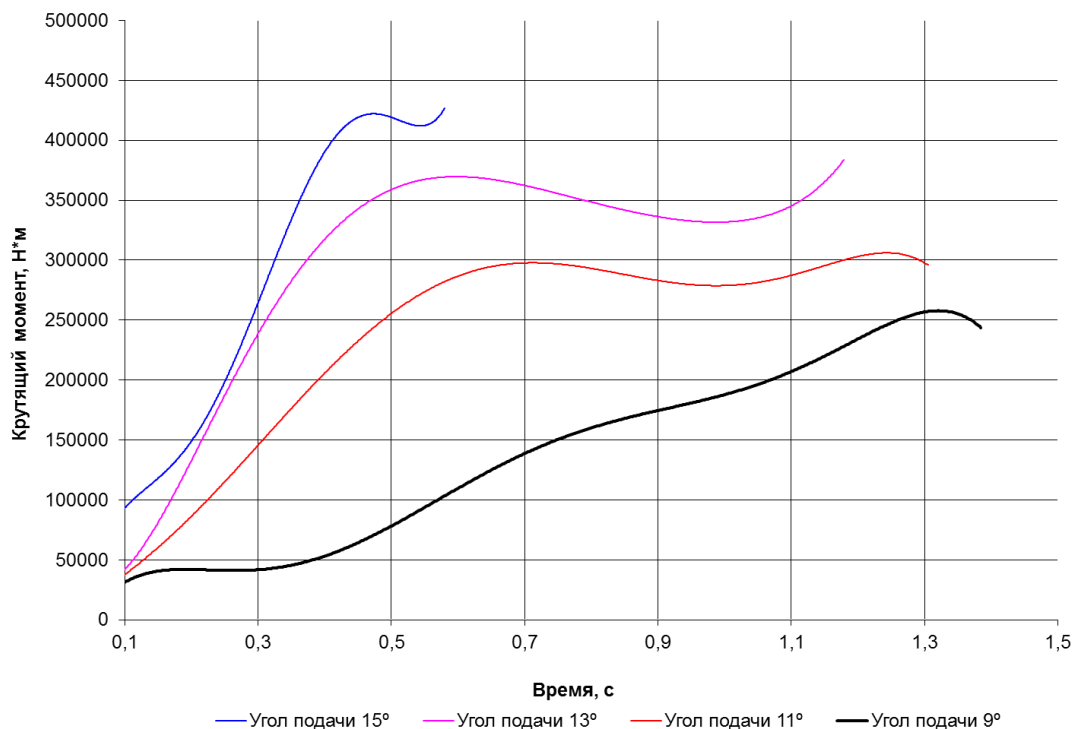


Рисунок 10 – Нарастание крутящего момента до установившегося режима при различных углах подачи

При увеличении угла подачи на 2 градуса крутящий момент увеличивается на 23% - при увеличении с 11 до 13 градусов и на 45 % - при увеличении с 11° до 15°. То есть с увеличением угла подачи на один градус крутящий момент увеличивается на 11 – 12 %.

Известно[33], что осевая скорость заготовки зависит от угла подачи:

$$V_{o.z.} = \frac{\pi \cdot D_b \cdot n_b}{60} \cdot \sin \beta \cdot \eta_o, \quad (1)$$

где  $V_{o.z.}$  - осевая скорость заготовки;

$D_b$  - диаметр валка прошивного;

$n_b$  - частота вращения валков;

$\beta$  - угол подачи;

$\eta_o$  - коэффициент осевого скольжения.

С увеличением угла подачи увеличивается и осевая скорость заготовки. Поэтому с увеличением угла подачи и уменьшением частоты вращения валков (согласно пропорции  $\frac{n_{b1}}{n_{b2}} = \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1}$ ) крутящий момент изменяется не значительно, при этом темп прошивки сохраняется прежним.

В данной работе при помощи моделирования в QForm также исследовалось влияние коэффициента овализации на уровень осевых растягивающих напряжений в центральной зоне заготовки. Было смоделировано два варианта процесса прошивки с коэффициентом овализации 1,16 и 1,20 (рисунок 11).

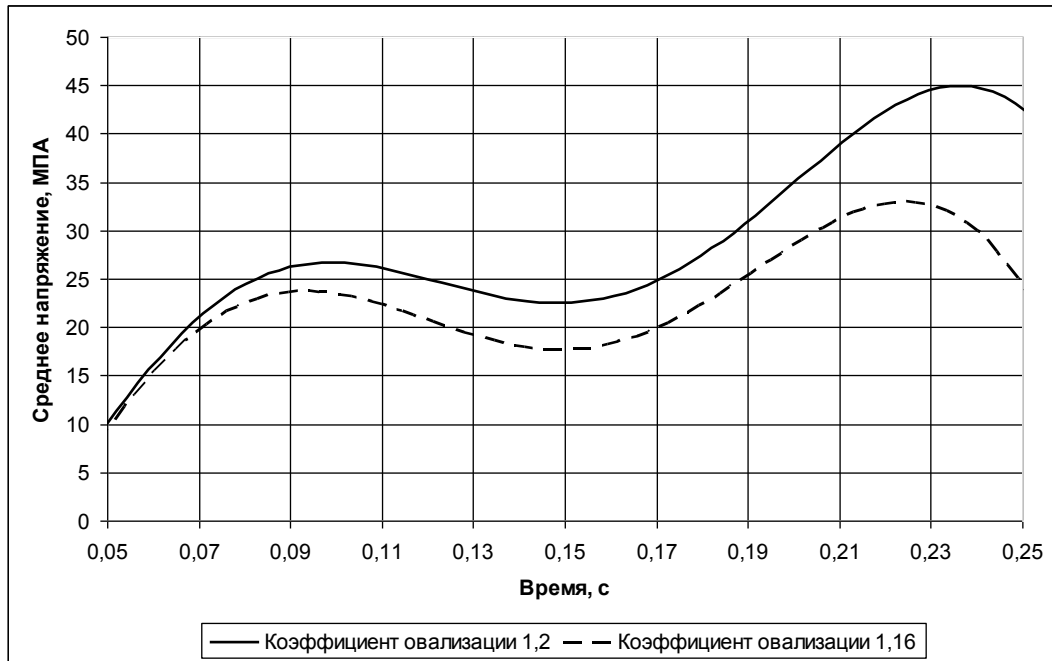


Рисунок 11 – Влияние коэффициента овализации на растягивающие напряжения в центральной зоне заготовки при ее прошивке

С увеличением коэффициента овализации увеличиваются растягивающие напряжения в центральной зоне заготовки. При повышенном коэффициенте овализации увеличиваются реакционные растягивающие напряжения в периферийных слоях заготовки, которые не находятся в непосредственном контакте с рабочим инструментом, и, следовательно, увеличиваются растягивающие напряжения в центральной зоне заготовки.

Таким образом, моделирование процесса прошивки на двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими неподвижными линейками позволило объяснить характер изменения напряженно-деформированного состояния металла при винтовой прокатке за один оборот заготовки, а также подтвердить гипотезу о влиянии подпирющих сил со стороны оправки на характер напряженно-деформирования заготовки и определить влияние коэффициента овализации и угла подачи на уровень осевых растягивающих напряжений в центральной зоне заготовки.



## 2.2 Математическое моделирование двухвалковой винтовой прошивки

### 2.2.1 Определение математических зависимостей очага деформации при двухвалковой винтовой прошивке

Основная сложность в математическом описании очага деформации при двухвалковой винтовой прошивке связана с определением расстояния от оси прокатки до поверхности валков в любом поперечном сечении очага деформации. Для прошивных станков с бочковидными валками такая задача решена [50]. При этом использовались следующие допущения:

- радиус – вектор кратчайшего расстояния  $r_x$  направлен по прямой, перпендикулярной оси валка, и проходит через ось заготовки;
- изменение радиуса заготовки в основной меридиональной плоскости незначительное.

Кратчайшее расстояние между осями заготовки и валка в любом сечении очага деформации [50] находится по выражению:

$$r_x = B' - R', \quad (2)$$

где  $R'$   $B'$  - радиус валка в рассматриваемом поперечном сечении и расстояние между осями заготовки и валка в плоскости, перпендикулярной оси валка и отсекающей на оси прошивки отрезок, равный  $x$ .

$$B' = \sqrt{(R_p + r_p)^2 + x^2 \cdot \sin^2 \beta}, \quad (3)$$

где  $R_p$  - радиус валка в пережиме валка;

$r_p$  - радиус заготовки в пережиме валков.

Радиус  $R'$  валка равен:

$$R' = R_p - x \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_b, \quad (4)$$

где  $\beta$  - угол подачи;

$\alpha_b$  - угол образующей валка.

Приведенные зависимости применимы для станов с бочковидными валками. На базе данных зависимостей совместно с А.А. Корсаковым разработан алгоритм расчета настроечных параметров для прошивного стана ТПА 159 – 426 и для его реализации разработана компьютерная программа [109-112]. Расстояние между осями заготовки и валка в плоскости, перпендикулярной оси валка определяется по выражениям [113, 114]:

для конуса прошивки:

$$B' = \sqrt{(R'_0 + r_0 - x_b \cdot \sin \varphi)^2 + x_b^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \beta}; \quad (5)$$

для конуса раскатки:

$$B' = \sqrt{(R'_0 + r_0 + x_b \cdot \sin \varphi)^2 + x_b^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \beta}, \quad (6)$$

где  $\varphi$  - угол раскатки;

$R'_0$  - кратчайшее расстояние от оси валка до заготовки в оси поворота;

$r_0$  - радиус заготовки в оси поворота;

$x_b$  - отрезок на оси валка, образованный осью поворота валка и плоскостью перпендикулярной оси валка.

Для определения настроечных параметров прошивного стана с грибовидными валками необходимо найти зависимость между длиной очага деформации и расстоянием от оси прокатки до поверхности валков  $r_x(x_{od})$ . Данная зависимость получена на основе проведения плоскости перпендикулярной оси

заготовки, и пересекающей ось валка на расстоянии  $x_b$  от оси поворота (рисунок 12).

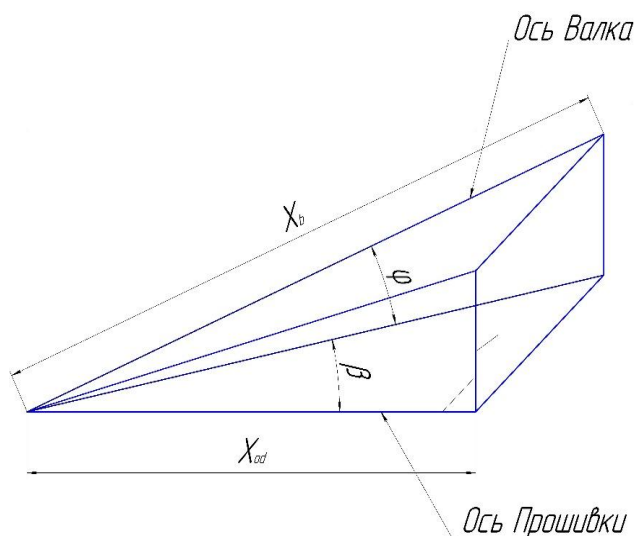


Рисунок 12 - Расчетная схема для определения длины очага деформации

Из расчетной схемы текущая длина очага деформации связана с отрезком  $x_b$  по следующему выражению:

$$x_b = \frac{x_{od}}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} . \quad (7)$$

Подставив выражения (7) в (5) и (6) получена зависимость расстояния между осью заготовки и осью валка от длины очага деформации:

для конуса прошивки:

$$B' = \sqrt{\left(R_0' + r_0 - \frac{x_{od} \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}\right)^2 + x_{od}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} ; \quad (8)$$

для конуса раскатки:

$$B' = \sqrt{\left(R_0' + r_0 + \frac{x_{od} \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}\right)^2 + x_{od}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} , \quad (9)$$

Радиус валка в текущем сечении поперечного разреза очага деформации определен при допущении: изменение радиуса валка в его основной меридиональной плоскости незначительное; (Рисунок 13).

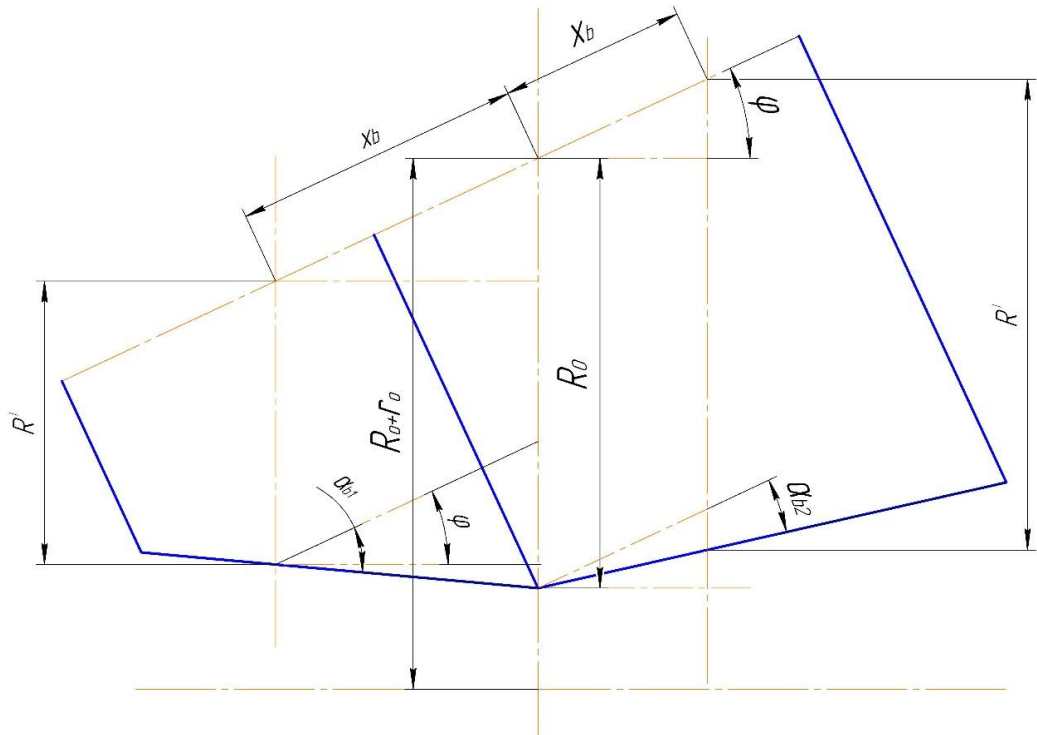


Рисунок 13 – Расчетная схема для определения радиуса валка в любом поперечном сечении

Радиус валка в конусе раскатки равен:

$$R' = R'_0 + x_b \cdot (\sin \varphi - \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_{b2})), \quad (10)$$

в конусе прошивки:

$$R' = R'_0 - x_b \cdot (\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{b1} - \varphi)). \quad (11)$$

где  $\alpha_{b1}$  - угол валка в конусе прошивки;

$\alpha_{b2}$  - угол валка в конусе раскатки.

В результате получены следующие зависимости между длиной очага деформации и расстоянием от оси прокатки до поверхности валков в любом поперечном сечении очага деформации:

для конуса прошивки:

$$r_x(x_{od}) = \sqrt{\left(R'_0 + r_0 - \frac{x_{od} \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}\right)^2 + x_{od}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} - R'_0 + \frac{x_{od}}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} \cdot (\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{b1} - \varphi)); \quad (12)$$

для конуса раскатки:

$$r_x(x_{od}) = \sqrt{\left(R'_0 + r_0 + \frac{x_{od} \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}\right)^2 + x_{od}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} - R'_0 - \frac{x_{od}}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} \cdot (\sin \varphi - \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_{b2})). \quad (13)$$

Для оценки погрешности, обусловленной принятым допущением, с использованием программного продукта Компас – 3D (рисунок 14), было проведено твердотельное моделирование процесса прошивки на двухвалковом стане винтовой прокатки с грибовидными валками при различных углах подачи. Параметры моделирования: угол раскатки 15 град; радиус валка в пережиме 650 мм; угол валка в конусе прошивки 18 град; угол валка в конусе раскатки 12 град. На рисунке 15 и 16 приведены изменения расстояния от оси прокатки до поверхности валков в основной меридиональной плоскости заготовки  $\Delta r$ .

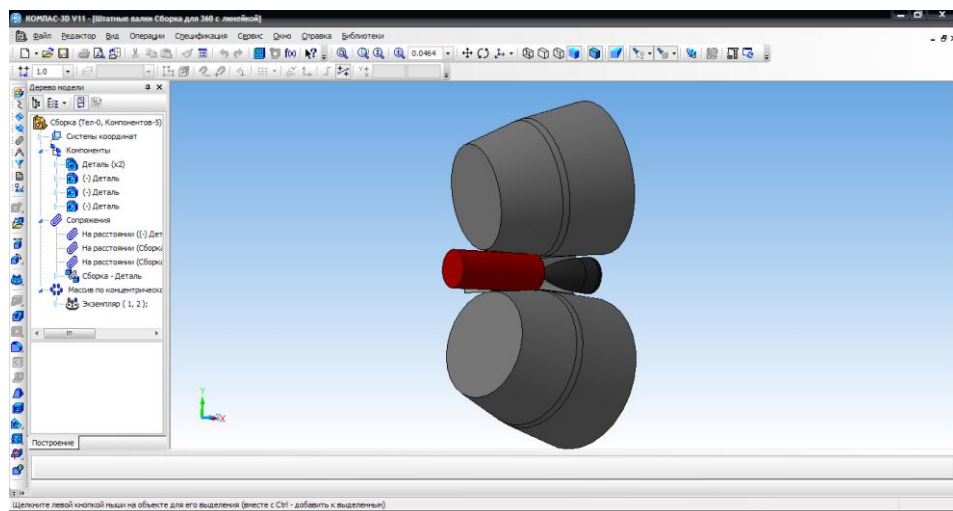


Рисунок 14 Твердотельное моделирование в Компас – 3D

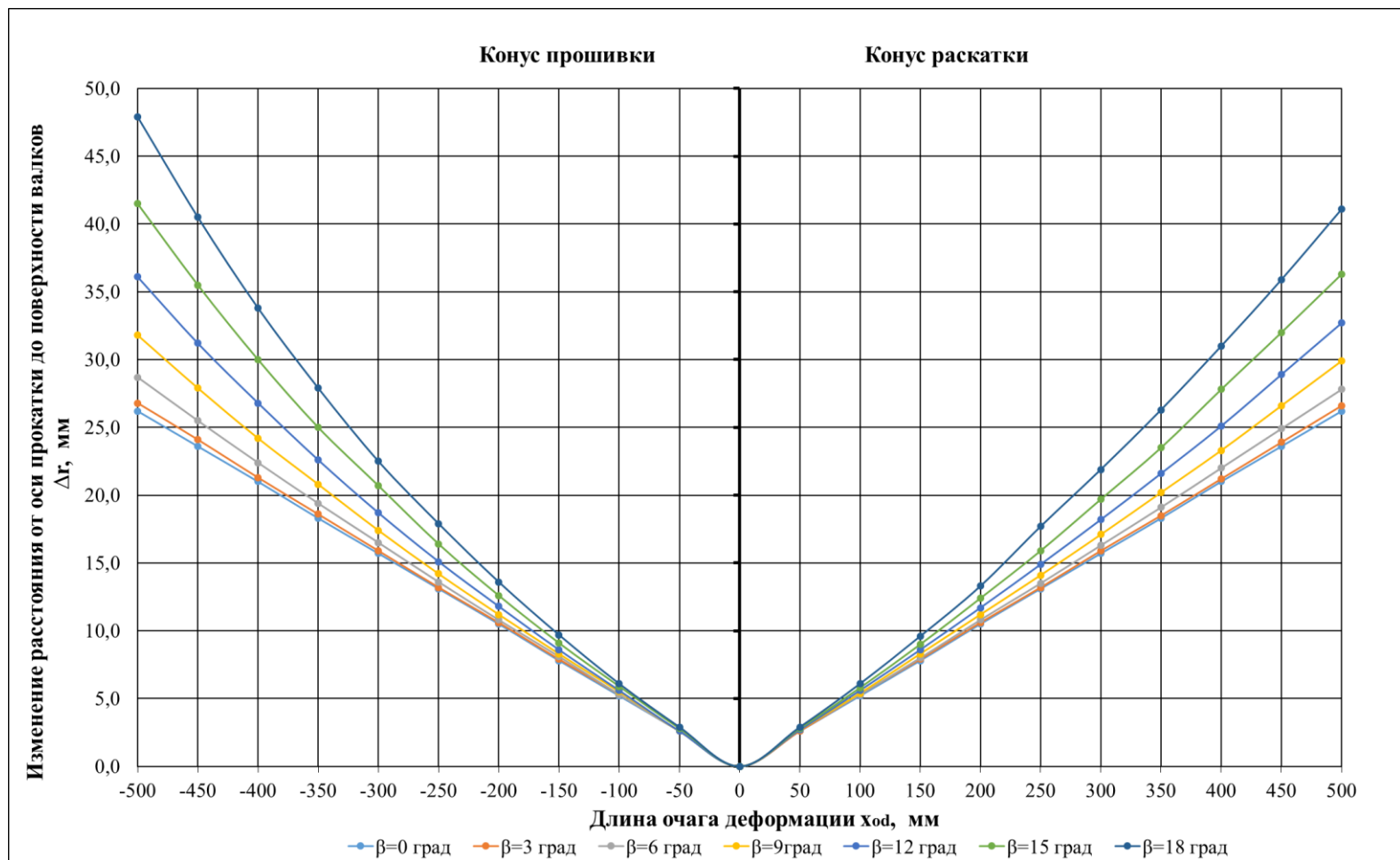


Рисунок 15 – Изменение по длине очага деформации кратчайшего расстояния от оси прокатки до поверхности валков, полученное в результате моделирования.

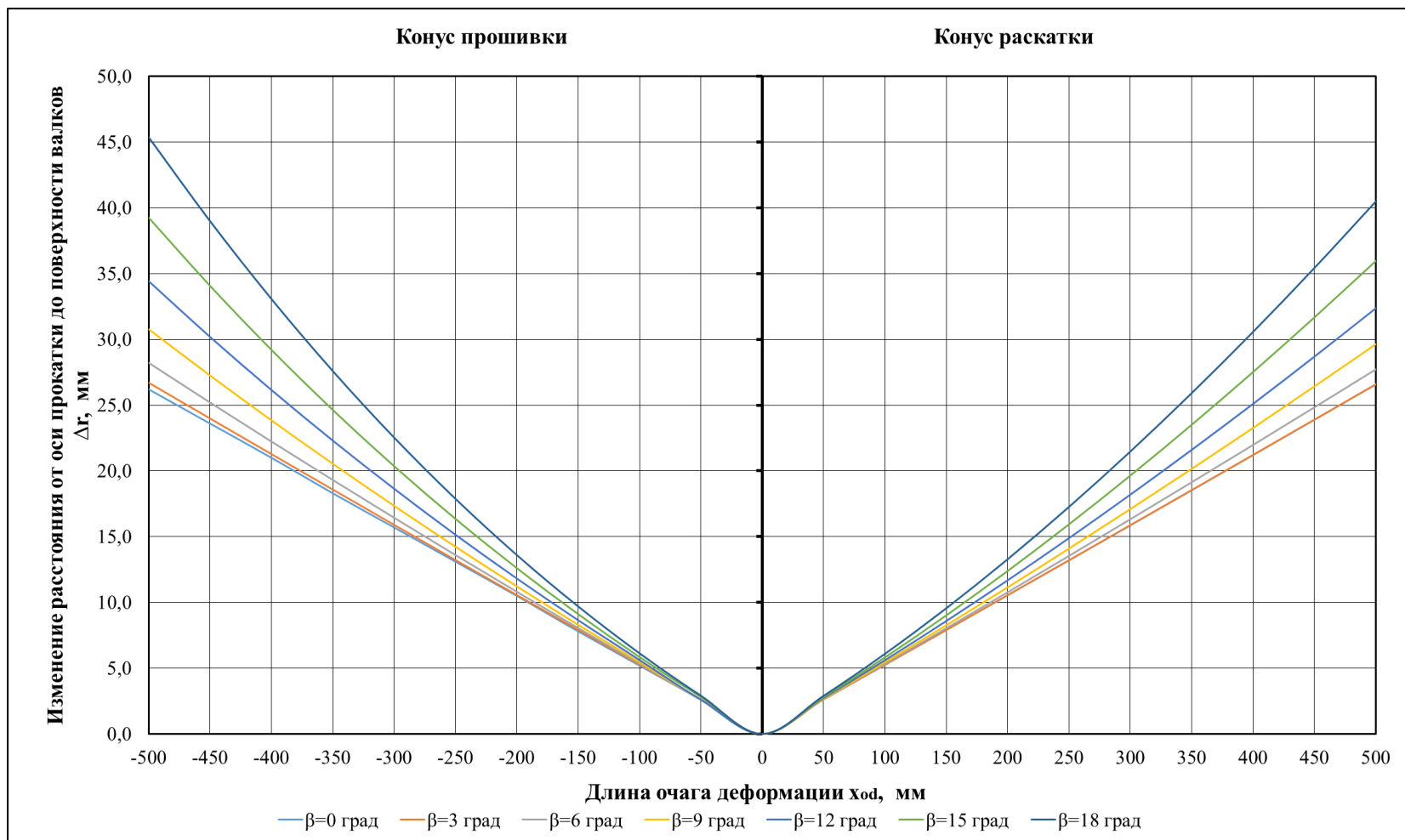


Рисунок 16 – Изменение по длине очага деформации кратчайшего расстояния от оси прокатки до поверхности валков, полученное в результате расчета.

Сравнение значений  $r_x(x_{od})$  показало хорошую сходимость и правомочность принятого допущения. Наибольшее отклонение наблюдается в конусе прошивки при угле подачи 18 градусов на длине очага деформации  $x_{od} = 500$  мм и равно 6,9%. Однако, на практике такие углы подачи при двухвалковой винтовой прошивке не применяются.

### 2.2.2 Методика по определению настроечных параметров процесса двухвалковой винтовой прошивки

На основе полученных зависимостей разработана методика по определению основных настроечных параметров процесса винтовой прошивки (рисунок 17), учитывающая искажение очага деформации на угол подачи: расстояние между валками в пережиме валков; выдвижение оправки за пережим валков; обжатие перед носком оправки; расстояние от захвата заготовки валками до носка оправки; расстояние между линейками.

Исходными данными для определения позиционирования прокатного инструмента являются диаметр заготовки, размеры получаемой гильзы (наружный диаметр гильзы, толщина стенки), калибровка прокатного инструмента.

Кроме позиционирования прокатного инструмента прошивного стана необходимо знать критерии ведения процесса при двухвалковой винтовой прошивке, которые обеспечивают условия вторичного захвата и качество поверхностей гильзы: относительное обжатие перед носком оправки, расстояние от захвата заготовки валками до носка оправки, коэффициент овализации в пережиме валков.



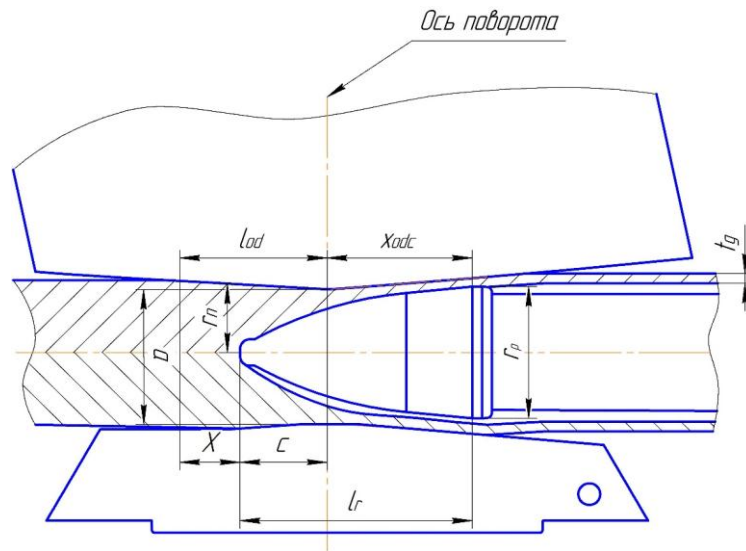


Рисунок 17 – Схема очага деформации при двухвалковой винтовой прошивке

Радиус заготовки в оси поворота совпадает с половинным расстоянием между валками в их пережиме  $\frac{a}{2} = r_0$ .

Для правильного позиционирования оправки в очаге деформации необходимо найти длину очага деформации в конусе раскатки  $x_{ode}$ , где формируется толщина стенки гильзы. Длина очага деформации определяется из выражения

$$r_{op} + t_g = \sqrt{\left(R'_0 + r_0 + \frac{x_{ode} \cdot tg \varphi}{\cos \beta}\right)^2 + x_{ode}^2 \cdot tg^2 \beta} - R'_0 - \frac{x_{ode}}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} \cdot (\sin \varphi - \cos \varphi \cdot tg(\varphi - \alpha_{b2})), \quad (14)$$

где  $r_{op}$  - радиус оправки;

$t_g$  - толщина стенки гильзы.

Из выражения (14) длина очага деформации, где формируется стенка, равна:

$$x_{ode} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}, \quad (15)$$

где  $A, B, C$  - величины, вычисляемые по следующим выражениям:

$$A = \frac{(\sin \varphi - \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_{b2}))^2}{\cos^2 \beta \cdot \cos^2 \varphi} - \operatorname{tg}^2 \beta - \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{\cos^2 \beta}, \quad (16)$$

$$B = 2 \cdot (r_{op} + t_g + R'_0) \cdot \frac{(\sin \varphi - \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \alpha_{b2}))}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} - 2 \cdot (R'_0 + r_0) \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}, \quad (17)$$

$$C = (r_{op} + t_g + R'_0)^2 - (r_0 + R'_0)^2. \quad (18)$$

Определив длину очага деформации в конусе раскатки, рассчитывается выдвигание оправки за пережим валков по формуле:

$$c = l_r - x_{odc}, \quad (19)$$

где  $l_r$  - длина оправки.

При определении настроечных параметров необходимо учитывать обжатие перед носком оправки  $\varepsilon_n$  и расстояние от захвата заготовки валками до носка оправки  $X$ .

Обжатие перед носком оправки равно:

$$\varepsilon_n = \left( \frac{r_z - r_n}{r_z} \right) \cdot 100\%, \quad (20)$$

где  $r_z$  - радиус заготовки;

$r_n$  - радиус перед носком оправки, равный:

$$r_n = \sqrt{\left( R'_0 + r_0 - \frac{c \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta} \right)^2 + c^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} - R'_0 + \frac{c}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} \cdot (\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{b1} - \varphi)). \quad (21)$$

Расстояние от захвата заготовки валками до носка оправки  $X$ , определяется из выражения:

$$X = l_{od} - c, \quad (22)$$

где  $l_{od}$  - длина очага деформации в конусе прошивки, полученная из следующего выражения:

$$r_z = \sqrt{\left(R'_0 + r_0 - \frac{l_{od} \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}\right)^2 + l_{od}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} - R'_0 + \frac{l_{od}}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} \cdot (\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} (\alpha_{b1} - \varphi)). \quad (23)$$

В результате решения уравнения (23) длина очага деформации в конусе прошивки равна:

$$l_{od} = \frac{-B_1 - \sqrt{B_1^2 - 4 \cdot A_1 \cdot C_1}}{2 \cdot A_1}, \quad (24)$$

где  $A_1, B_1, C_1$  - величины, вычисляемые по следующим выражениям:

$$A_1 = \frac{(\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} (\alpha_{b1} - \varphi))^2}{\cos^2 \beta \cdot \cos^2 \varphi} - \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{\cos^2 \beta} - \operatorname{tg}^2 \beta; \quad (25)$$

$$B_1 = \frac{2 \cdot (R'_0 + r_0) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta} - \frac{2 \cdot (r_z + R'_0) \cdot (\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} (\alpha_{b1} - \varphi))}{\cos \beta \cdot \cos \varphi}; \quad (26)$$

$$C_1 = (R'_0 + r_z)^2 - (R'_0 + r_0)^2. \quad (27)$$

Расстояние между линейками в пережиме валков равно:

$$r_{lx} = r_{lg} - x_{odc} \cdot \operatorname{tg} \alpha_l, \quad (28)$$

где  $r_{lg}$  - расстояние от оси прокатки до поверхности линейки, в поперечном сечении очага деформации, в котором окончательно формируется толщина стенки гильзы;

$\alpha_1$  - угол на выходном участке гребня линейки.

Для анализа разработанной методики было проведено численное исследование. При этом результаты расчета сравнивались с методикой настройки прошивного стана, основанной на твердотельном моделировании процесса прошивки. Данная методика подтвердила свою работоспособность при освоении прошивного стана в трубопрокатном цехе №3 «Волжского трубного завода».

В таблице 1 представлены исходные данные для определения настроечных параметров.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета настроечных параметров

Радиус заготовки, мм	Радиус гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм	Радиус валка в их пережиме, мм	Угол валка в конусе прошивки, град	Угол валка в конусе раскатки, град	Расстояние между валками в их пережиме, мм	Радиус оправки, мм	Длина рабочей поверхности оправки, мм	Угол на выходном участке гребня линейки, град	Угол раскатки, град
200	216,5	27	650	18	12	176	181	650	4	15

В таблице 2 показаны результаты расчета настроечных параметров при использовании твердотельного моделирования и по разработанной методике.

Таблица 2 – Результаты расчета настроечных параметров

Угол подачи, град	Математическая модель				Твердотельное моделирование			
	Выдвижение оправки, мм	Расстояние между линейками, мм	Обжатие перед носком оправки, %	Расстояние от захвата заготовки до носка оправки, мм	Выдвижение оправки, мм	Расстояние между линейками, мм	Обжатие перед носком оправки, %	Расстояние от захвата заготовки до носка оправки, мм
0	39	185	11	418	40	185	11	418
6	77	188	10	353	80	188	10	346
12	156	194	7,5	214	159	194	7,5	208
18	237	196	3,8	78	232	195	4	84

Как видно из таблицы 2 максимальное отклонение наблюдается при угле подачи равного 18 градусам: выдвигание оправки больше на 2,1 %; обжатие перед носком оправки ниже 5%; расстояние от захвата заготовки до носка оправки меньше на 7,1%.

На рисунке 18 показано как согласно разработанной методике изменяется толщина стенки гильзы при различном выдвигании оправки за пережим на различных углах подачи.

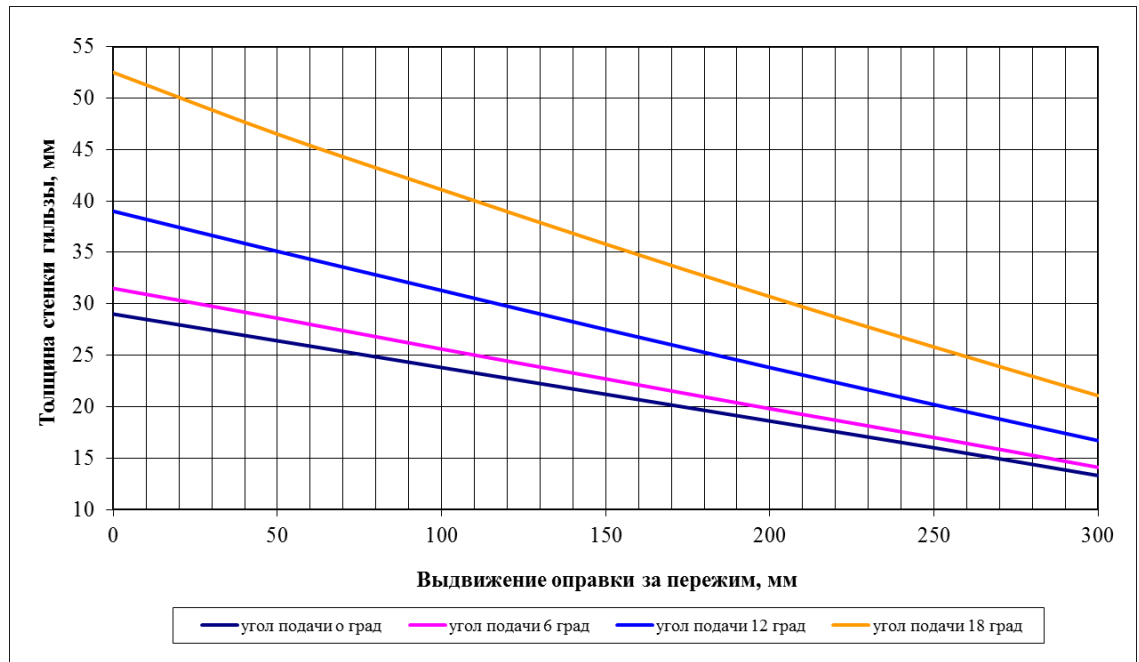


Рисунок 18 – Толщины стенки гильзы при различном выдвигании на различных углах подачи

Как видно из рисунка 18 максимальная разница между толщинами стенок при прошивке на различных углах подачи наблюдается при выдвигании оправки за пережим  $c=0$  мм, то есть когда оправка полностью находится в конусе раскатки и толщина стенки гильзы формируется на максимальном расстоянии в конусе раскатки.

На рисунках 19 и 20 изображены изменения обжатия перед носком оправки и расстояния от захвата заготовки валками до носка оправки в зависимости от выдвигания оправки за пережим валков при различных углах подачи.

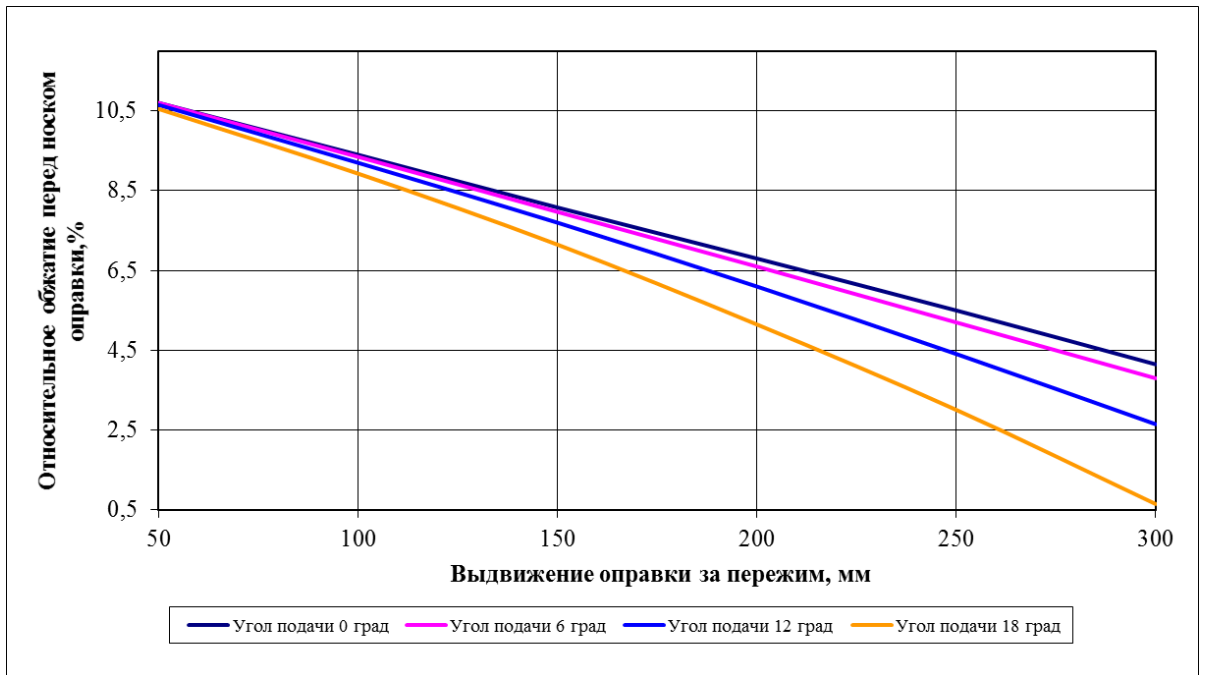


Рисунок 19 - Относительное обжатие перед носком оправки при различном угле подачи

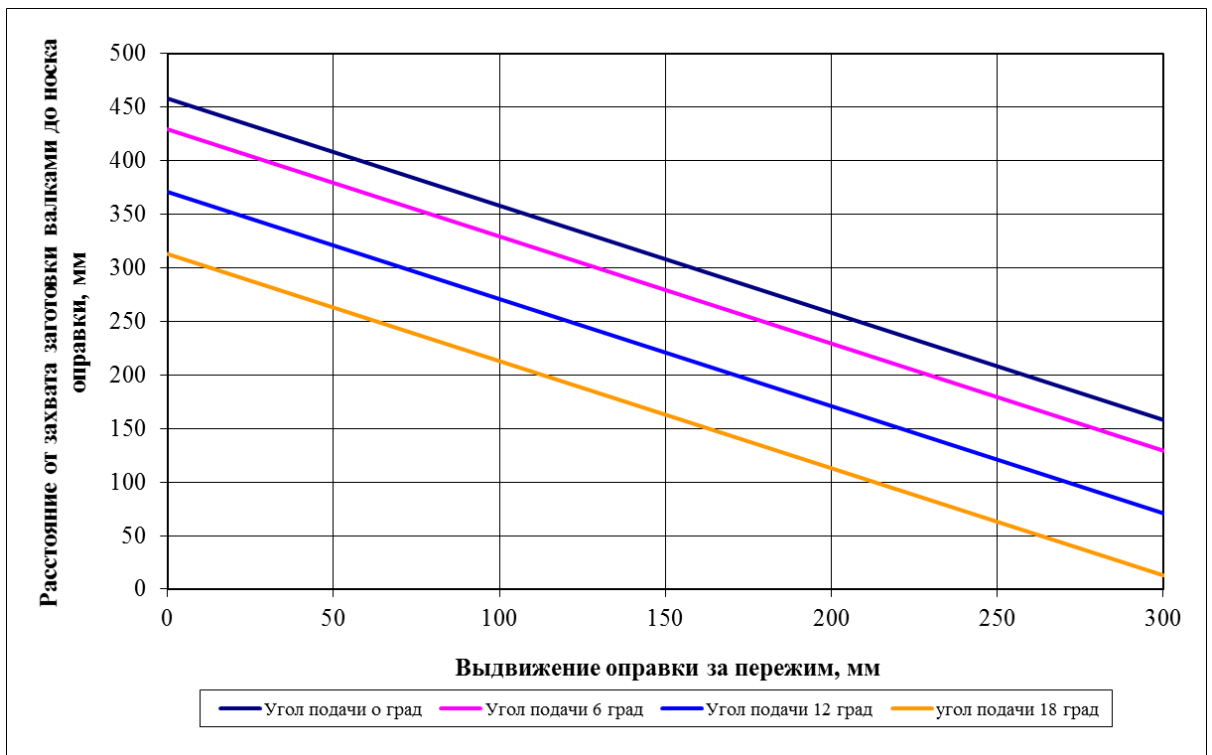


Рисунок 20 – Расстояние от захвата заготовки валками до носка оправки при различных углах подачи.

Как видно из рисунков 19 и 20 увеличение угла подачи значительно уменьшает обжатие перед носком оправки и расстояние от захвата заготовки валками до носка оправки, что подтверждает практический и теоретический опыт трубного производства и показывает необходимость учета угла подачи при разработке технологии прошивки.

### 2.2.3 Математическая модель для проектирования линеек

При получении тонкостенных гильз на двухвалковых станах винтовой прокатки происходит высокое развитие внеконтактной деформации и увеличение овальности «заготовки – гильзы», что приводит к снижению точности гильз.

Уменьшение уровня внеконтактной деформации может быть достигнуто снижением коэффициента овализации в пережиме валков (за счет уменьшения расстояния между линейками в пережиме валков). Но ведение процесса прошивки при малом коэффициенте овализации сопровождается негативными явлениями: ухудшением условий вторичного захвата (из-за сопротивления линеек перемещению заготовок в конусе прошивки очага деформации); повышенному износу линеек, так как направляющий инструмент начинает выполнять функции основного деформирующего инструмента; вероятностью потери устойчивости в конце процесса прошивки при получении гильз со значительным увеличением наружного диаметра гильзы по сравнению с диаметром заготовки («подъемом» наружного диаметра гильзы).

Для ликвидации вышеописанных недостатков предлагается внеконтактную деформацию снижать не за счет уменьшения коэффициента овализации, а использовать специальную профилировку рабочей поверхности линеек, которая позволяет значительно снижать внеконтактную деформацию не только в основной меридиональной плоскости «заготовки-гильзы». При этом сопротивление перемещению металла в геликоидальном направлении должно быть минимальным. Для выполнения данных условий предлагается выполнять

радиус рабочего желоба линейки в пережиме по окружности, определяемой выражением [115]:

$$R = r_z \cdot (1 - \varepsilon_p) \cdot \xi_p + \frac{\rho_{\varphi_c}^2 - r_z^2 \cdot (1 - \varepsilon_p)^2 \cdot \xi_p^2}{2 \cdot \left( r_z \cdot (1 - \varepsilon_p) \cdot \xi_p - \rho_{\varphi_c} \cdot \cos \left( \varphi_c - \frac{\pi}{2} \right) \right)}, \quad (29)$$

где  $\varepsilon_p$  - относительное обжатие заготовки в пережиме валков;

$\xi_p$  - коэффициент овализации в пережиме валков;

$\varphi_c$  - угол меридионального сечения заготовки, изменяющийся в пределах

от  $\frac{\pi}{2} + \frac{\pi - \varphi_k - \frac{\pi}{2}}{2}$  до  $\frac{\pi}{2} + \frac{2 \cdot \left( \pi - \varphi_k - \frac{\pi}{2} \right)}{3}$ .

$\rho_{\varphi_c}$  - радиус логарифмической спирали, соответствующий углу  $\varphi_c$  и определяемый из выражения:

$$\rho = C_1 \cdot e^{f \cdot \varphi} + C_2, \quad (30)$$

где  $\rho$  - радиус - вектор заготовки;

$f$  - коэффициент трения;

$C_1, C_2$  - параметры уравнения логарифмической спирали, зависящие от положения полюса логарифмической спирали.

Для определения параметров логарифмической спирали использовались следующие условия:

$$\begin{cases} \varphi = \pi - \varphi_k, \rho = r_{\varphi_k} \\ \varphi = \frac{\pi}{2}, \rho = r_z \cdot (1 - \varepsilon_p) \cdot \xi_p \end{cases}, \quad (31)$$

$\varphi_k$  - угол меридионального сечения заготовки в пережиме валков;

$r_{\varphi_k}$  - радиус-вектор заготовки в пережиме валков;



$r_z$  - радиус заготовки;

$\varepsilon_p$  - относительное обжатие в пережиме валков;

$\xi_p$  - коэффициент овализации в пережиме валков.

В результате параметры логарифмической спирали равны:

$$\begin{cases} C_2 = \frac{r_z \cdot (1 - \varepsilon_p) \cdot \xi_p - r_{\varphi_k} \cdot e^{f \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_k\right)}}{1 - e^{f \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_k\right)}} \\ C_1 = \frac{r_{\varphi_k} - C_2}{e^{f \cdot (\pi - \varphi_k)}} \end{cases} \quad (32)$$

Радиус-вектор заготовки в пережиме валков согласно работе [50] находится по выражению:

$$r_{\varphi_k} = \sqrt{2 \cdot R_{0p} \cdot (R_{0p} + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))} \cdot \sqrt{\frac{R_{0p}}{2 \cdot (R_{0p} + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))} + \frac{(R_{0p} + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))}{2 \cdot R_{0p}} - \cos \omega}, \quad (33)$$

где  $R_{0p}$  - кратчайшее расстояние от оси валка до заготовки в пережиме валков;

$\omega$  - угол меридионального сечения валка в пережиме, определяемый по формуле:

$$\omega = \arcsin \frac{b_p}{R_{0p}}, \quad (34)$$

где  $b_p$  - ширина контактной поверхности в пережиме валков.

Ширина контактной поверхности в пережиме по валку равна [50]

$$b_p = r_z \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \varepsilon_p)}{1 + i} \cdot \left( \pi \cdot (tg \alpha'_1 + tg \varphi_p) \cdot tg \beta \cdot \frac{\eta_0}{\eta_T \cdot \lambda_z} + (1 - \varepsilon_p) \cdot (\xi_p - 1) \right)}, \quad (35)$$

где  $i$  - отношение радиуса заготовки-гильзы в пережиме к кратчайшему расстоянию от оси валка до заготовки в пережиме валков;

$\lambda_{\Sigma}$  - суммарная вытяжка на прошивном стане.

$\varphi_p$  - угол конусности сферической оправки, определяемый по формуле [33]:

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{R_f \cdot \sin \alpha_{o2} + l_2 - x'}{\sqrt{R_f^2 - (R_f \cdot \sin \alpha_{o2} + l_2 - x')^2}}, \quad (36)$$

где  $x'$  - текущее значение координаты изменяющейся от  $x' = 0$  у основания оправки до  $x' = l_2$  в конце обжимного ее конуса;

$R_f$  - радиус сферической оправки;

$\alpha_{o2}$  - угол калибрующего участка оправки.

Угол меридионального сечения заготовки в пережиме валков равен:

$$\varphi_k = \arcsin \frac{b_p}{r_{\varphi_k}}. \quad (37)$$

Для численного исследования разработанной математической модели рассмотрен процесс прошивки заготовок диаметром 290 мм и 360 мм. В таблице 3 представлены исходные данные калибровки прокатного инструмента (валков и оправки).

Таблица 3 - Исходные данные для расчета радиуса желоба линейки

Диаметр заготовки, мм	Радиус валка в пережиме, мм	Угол раскатки, град	Угол валка в конусе прошивки, град	Радиус оправки, мм	Длина рабочей поверхности оправки, мм	Угол калибрующего участка оправки, град
290	650	12	15	799,7	310	5,5
360	650	12	15	1024	420	5,5

В таблице 4 представлены настроечные параметры и результаты расчета по определению радиуса желоба линейки.

Таблице 4 – Настроечные параметры и результаты расчета

Диаметр заготовки, мм	Коэффициент вытяжки	Настроечные параметры				Результат расчета			
		Угол подачи, град	Выдвижение оправки, мм	Обжатие в пережиме валков, %	Коэффициент овализации	Ширина контактной поверхности, мм	Радиус-вектор заготовки, мм	Угол меридионального сечения, град	Радиус желоба, мм
290	3,31	9	111	12	1,12	71,4	150,2	28,3	163,8
360	2,96	8	78	9	1,10	84,4	189,9	26,4	206,7

На рисунках 21 представлена зависимость радиуса желоба линейки от угла подачи для заготовок диаметром 290 мм и 360 мм.

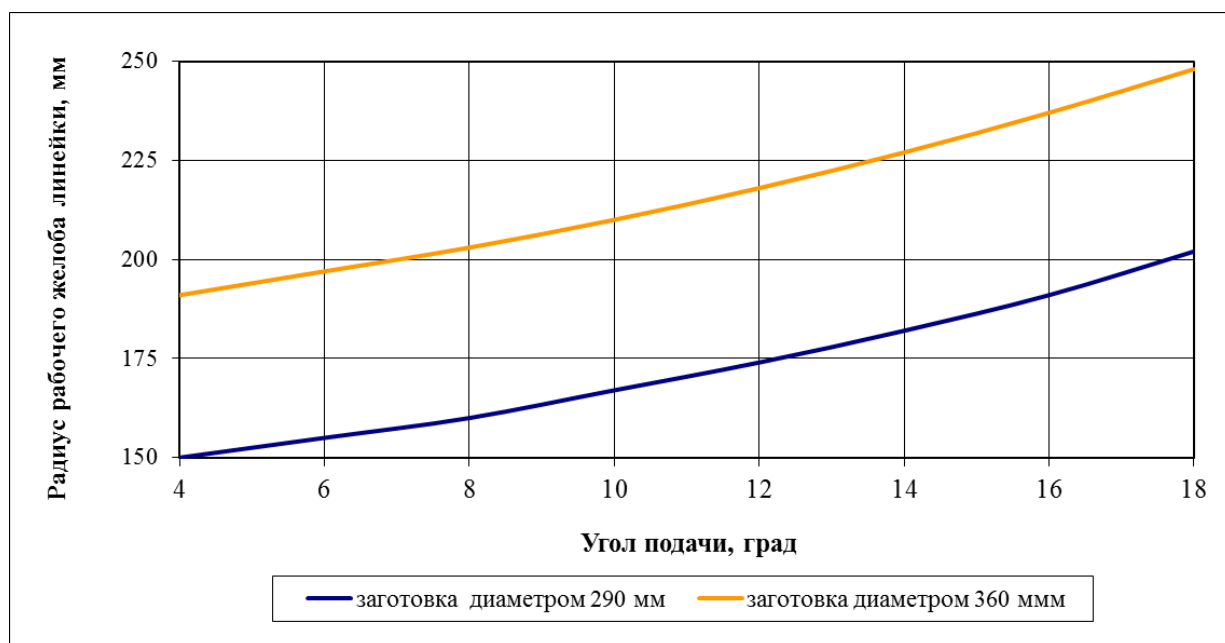


Рисунок 21 – Радиус рабочего желоба линейки в зависимости от угла подачи

С увеличением угла подачи радиус рабочего желоба линейки увеличивается, так как происходит рост ширины контактной поверхности прошиваемого металла с валками за счет увеличения шага осевой подачи заготовки за ее полуоборот. При увеличении коэффициента вытяжки радиус рабочего желоба линейки уменьшается (Рисунок 22). Это связано с уменьшением шага осевой подачи

заготовки за ее полуоборот и увеличением овальности заготовки – гильзы в очаге деформации.

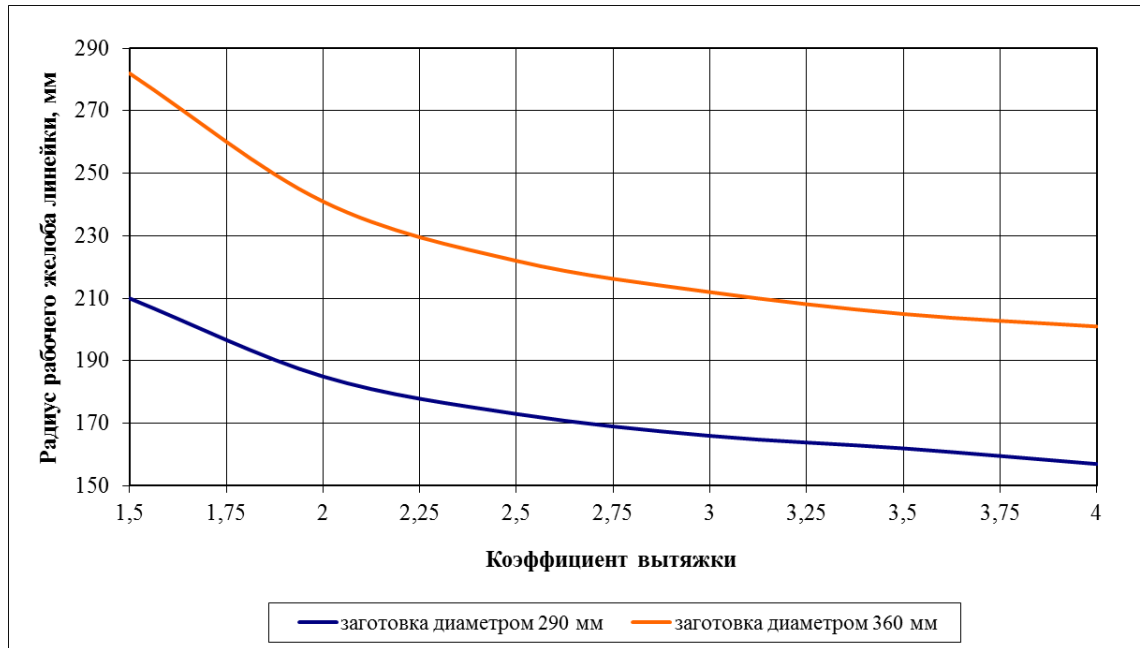


Рисунок 22 – Радиус рабочего желоба линейки в зависимости от коэффициента вытяжки

#### 2.2.4 Математическая модель для проектирования оправок при получении тонкостенных гильз

Основная сложность при разработке оправок для прошивки тонкостенных гильз заключается в определении ее наибольшего диаметра. Для нахождения диаметра оправки необходимо знать зазор между оправкой и получаемой гильзы (разница между внутренним диаметром гильзы и диаметром оправки, в технической литературе называемая «разбоем»). При получении тонкостенных гильз характерными являются два момента: утолщение стенки гильзы и уменьшение внутреннего диаметра гильзы из-за пластического изгиба стенки гильзы в конце калибрующего участка оправки в очаге деформации. Такой характер формоизменения металла в очаге деформации встречается при прошивке по технологической схеме «посад» наружного диаметра гильзы. На

трубопрокатном агрегате «ТПА-140» ОАО «СинТЗ» специалистами ОАО «РосНИТИ» разработана и исследована технология получения труб из непрерывнолитой заготовки повышенного диаметра [116, 117, 118]. Согласно разработанной технологии для получения гильз использовалась технологическая схема «посада» наружного диаметра гильзы: из заготовки диаметром 150-156 мм получали тонкостенную гильзу диаметром 128-130 мм.

На рисунке 23 представлен фрагмент заторможенной заготовки в прошивном стане Синарского трубного завода, полученного при прошивке тонкостенной гильзы с уменьшением наружного диаметра.

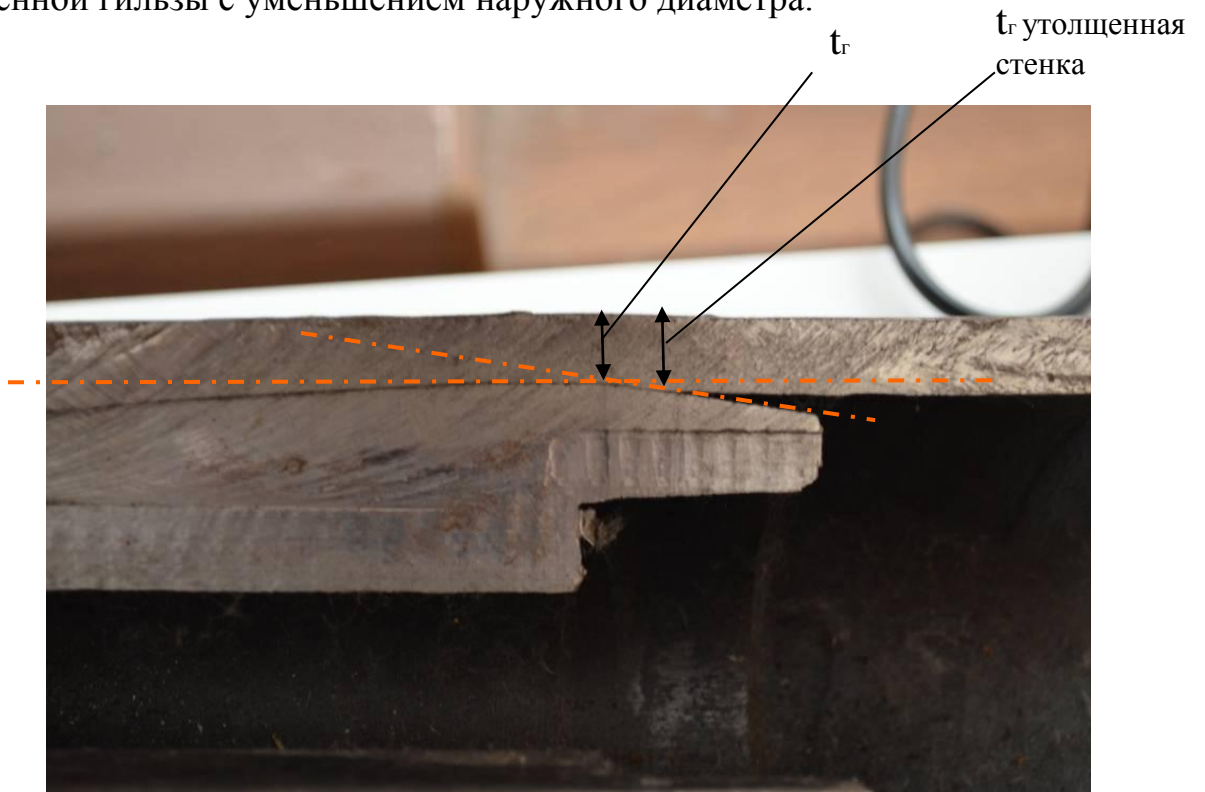


Рисунок 23 – Фрагмент заторможенной заготовки в прошивном стане

Значительное влияние на пластический изгиб тонкостенных гильз оказывает степень овализации очага деформации в поперечном сечении на калибрующем участке оправки, определяемая калибровкой прокатного инструмента и настроечными параметрами прошивного стана.

При расчетах по данной методике «разбой» гильзы зависит от настроечных параметров процесса прошивки и основывается на равенстве внутреннего

периметра гильзы с внутренним периметром заготовки-гильзы в сечении схода металла с оправки [115].

То есть

$$P_x = P_g, \quad (38)$$

где  $P_x$  – внутренний периметр заготовки-гильзы в сечении схода гильзы с оправки;

$P_g$  – периметр внутренней поверхности гильзы.

Периметр внутренней поверхности гильзы равен:

$$P_g = 2 \cdot \pi \cdot (r_g - t_g), \quad (39)$$

где  $r_g$  – радиус гильзы;

$t_g$  – толщина стенки гильзы.

Внутренняя поверхность заготовки-гильзы в сечении схода с оправки имеет форму эллипса. Периметр эллипса находим по формуле Рамануджана:

$$P_x = \pi \cdot \left( 3 \cdot (a+b) - \sqrt{(3 \cdot a+b) \cdot (a+3 \cdot b)} \right), \quad (40)$$

где  $a$  – малая полуось эллипса;

$b$  – большая полуось эллипса:

$$a = r_g - \frac{\Delta}{2} - t_g; \quad (41)$$

$$b = r_{lx} - t_g, \quad (42)$$

где  $r_{lx}$  – расстояние от оси прокатки до поверхности линеек в сечении, соответствующем сходу заготовки-гильзы с оправки, определяемое по следующему выражению:

$$r_{lx} = r_p \cdot \xi_p + \left( \frac{r_g - \frac{\Delta}{2} - r_p}{tg\alpha_b} \right) \cdot tg\alpha_l, \quad (43)$$

где  $r_p$  – радиус заготовки в пережиме валков;

$\xi_p$  – коэффициент овализации в пережиме валков;

$\alpha_l$  – угол конуса линейки в выходном конусе очага деформации;

$\alpha_b$  – угол конусности очага деформации по валку с учетом разворота на угол подачи в выходном конусе очага деформации.

Подставив в выражении (40) выражения (41-43) получено уравнение:

$$2 \cdot (r_g - t_g) - 3 \cdot \left( r_g - \frac{\Delta}{2} - t_g + \left( r_p \cdot \xi_p + \left( \frac{r_g - \frac{\Delta}{2} - r_p}{tg\alpha_b} \right) \cdot tg\alpha_l \right) - t_g \right) + \quad (44)$$

$$+ \sqrt{\left( 3 \cdot \left( r_g - \frac{\Delta}{2} - t_g \right) + \left( r_p \cdot \xi_p + \left( \frac{r_g - \frac{\Delta}{2} - r_p}{tg\alpha_b} \right) \cdot tg\alpha_l \right) - t_g \right) \cdot \left( r_g - \frac{\Delta}{2} - t_g + 3 \cdot \left( r_p \cdot \xi_p + \left( \frac{r_g - \frac{\Delta}{2} - r_p}{tg\alpha_b} \right) \cdot tg\alpha_l \right) - t_g \right)} = 0.$$

Из выражения (44) величина «разбоя» равна:

$$\Delta = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{A}, \quad (45)$$

где  $A, B, C$  – величины, определяемые по следующим выражениям:

$$A = 6 \cdot \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_l}{\operatorname{tg} \alpha_b} \right)^2 - 4 \cdot \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_l}{\operatorname{tg} \alpha_b} \right) + 4; \quad (46)$$

$$B = \left( 4 \cdot r_g + 8 \cdot t_g - 12 \cdot \left( r_p \cdot \xi_p + \left( \frac{r_g - r_p}{\operatorname{tg} \alpha_b} \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_l \right) \right) \cdot \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_l}{\operatorname{tg} \alpha_b} \right) - 4 \cdot r_g + 4 \cdot \left( r_p \cdot \xi_p + \left( \frac{r_g - r_p}{\operatorname{tg} \alpha_b} \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_l \right); \quad (47)$$

$$C = -2 \cdot r_g^2 + 8 \cdot r_g \cdot t_g - (4 \cdot r_g + 8 \cdot t_g) \cdot \left( r_p \cdot \xi_p + \left( \frac{r_g - r_p}{\operatorname{tg} \alpha_b} \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_l \right) + 6 \cdot \left( r_p \cdot \xi_p + \left( \frac{r_g - r_p}{\operatorname{tg} \alpha_b} \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_l \right)^2. \quad (48)$$

Анализ данной методики показывает, что на величину «разбоя» значительное влияние оказывает, диаметр прошиваемой заготовки, коэффициент овализации и относительное обжатие заготовки в пережиме валков (Рисунок 24, 25).

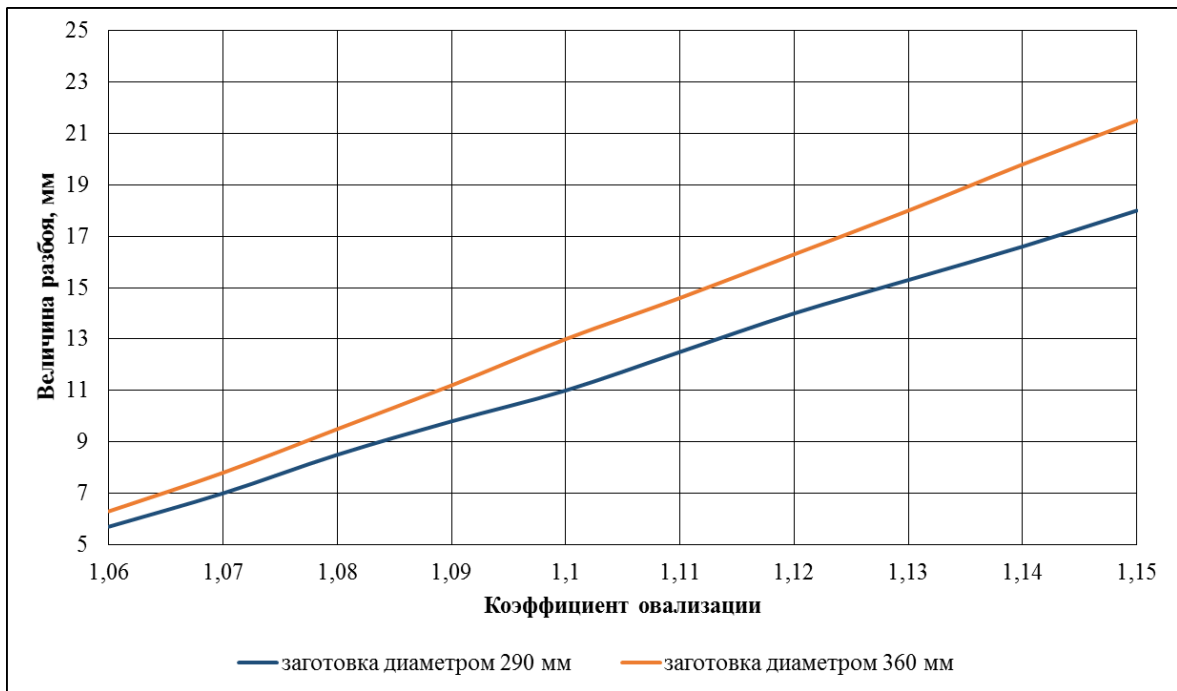


Рисунок 24 – Влияние коэффициента овализации на величину разбоя при прошивке заготовок диаметрами 290 мм и 360 мм



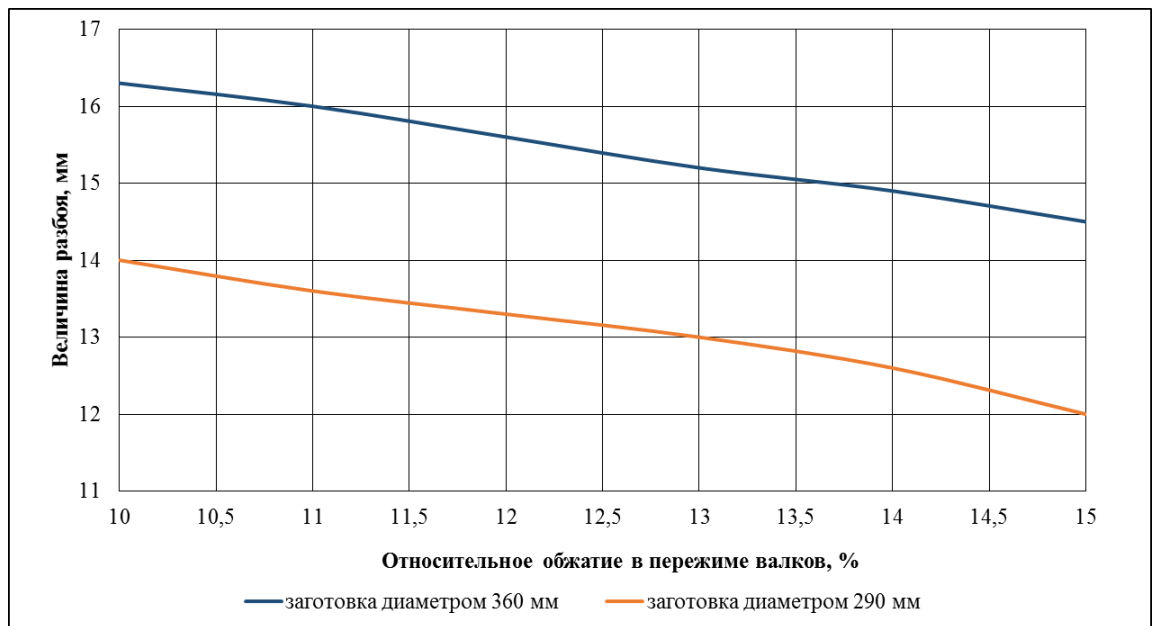


Рисунок 25 – Влияние относительного обжатия в пережиме валков на величину разбоя при прошивке заготовок диаметрами 290 мм и 360 мм

После определения величины «разбоя» и максимального диаметра оправки определяется длина оправки на основе соответствия очагу деформации, полученного при определении величины «разбоя».

## 2.3 Применение теории решения оптимизационных задач

Как отмечено выше, двухвалковая винтовая прошивка достаточно гибкий и маневренный процесс из-за относительно большого набора настроечных параметров и геометрических элементов калибровки прокатного инструмента прошивного стана. Для определения наилучшего сочетания настроечных параметров процесса прошивки, обеспечивающих более высокую производительность прошивного стана с лучшими показателями качества, в данной главе представлено математическое моделирование процесса винтовой двухвалковой прошивки, основанное на теории решения оптимизационных задач.

Следует отметить, что кроме настроечных параметров, на качество гильз влияет дополнительная операция – зацентровка. Наличие центровочного отверстия у заготовки способствует улучшению точности получаемых гильз и условиям вторичного захвата [119]. С другой стороны, неправильная зацентровка приводит к образованию дефектов. При получении тонкостенных гильз диаметр оправки и их форма весьма значительные, поэтому необходимо наносить достаточно большое и глубокое отверстия (диаметр основания выше 100 мм), что приводит к необходимости значительных усилий со стороны зацентровщика и оптимизация формы центровочного отверстия в заготовке является актуальной.

### 2.3.1 Оптимизация процесса двухвалковой винтовой прошивки

#### 2.3.1.1 Критерий оптимизации и набор управляющих параметров для двухвалковой винтовой прошивки

Рациональный режим прошивки обеспечивает получение качественной гильзы за минимальное время, то есть максимальную производительность, с сохранением качественных показателей гильзы.

Часовая производительность любого трубопрокатного стана вычисляется по формуле:

$$P = \frac{3600 \cdot G \cdot k}{T}, \quad (49)$$

где  $G$  – масса заготовки;

$k$  – коэффициент использования оборудования;

$T$  – такт прокатки.

Такт прошивки складывается из двух составляющих: времени деформации (машинного времени) и времени вспомогательных операций,

Машинное время прошивки составляет обычно 50...60 % общей длительности такта. Это означает, что увеличение производительности прошивного стана лучше всего достигается путем минимизации машинного времени, то есть за критерий оптимизации взято машинное время прокатки.

Для станов с бочковидными валками машинное время прокатки определяется по формуле:

$$T_m = \frac{L_g + L_{o.d.}}{V \cdot \sin \beta \cdot \eta_o}, \quad (50)$$

где  $L_g$  – длина гильзы;

$L_{o.d.}$  – длина очага деформации;

$V$  – средняя окружная скорость валков;

$\beta$  – угол подачи;

$\eta_o$  – коэффициент осевой скорости.

Длина гильзы определяется через вытяжку:

$$L_g = L_0 \cdot \lambda, \quad (51)$$

где  $L_0$  – длина заготовки.

Коэффициент вытяжки вычисляется по следующему выражению:

$$\lambda = \frac{r_z^2}{2 \cdot r_z \cdot (2 \cdot r_z - t_g)}. \quad (52)$$

Эффективным способом уменьшения машинного времени, а, следовательно, и увеличения производительности является использование повышенных углов подачи.

Длина очага деформации, входящая в формулу (50), в свою очередь, зависит от расстояния между валками в пережиме, то есть от относительного обжатия заготовки в пережиме.

Длина очага деформации с учетом перекоса валков на угол подачи для бочковидных валков вычисляется согласно работе [50] по следующей зависимости (как отмечено в п. 2.2.1 данные зависимости легли в основу алгоритма расчета настроечных параметров для прошивного стана ТПА 159-426):

$$L_{o.d.} = L_p + L_r = \frac{\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_p} \cdot (r_z - r_p) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}}{\frac{\sin^2 \beta}{R_p + r_p}} + \quad (53)$$

$$+ \frac{\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_p} \cdot (r_z - r_p) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2}}{\frac{\sin^2 \beta}{R_p + r_p}}$$

Выразив радиус заготовки в пережиме валков через относительное обжатие, получим следующую зависимость:

$$L_{o.d.} = \frac{\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p)} \cdot \varepsilon_p \cdot r_z - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}}{\frac{\sin^2 \beta}{R_p + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p)}} +$$

$$+ \frac{\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p)} \cdot (r_g - r_z \cdot (1 - \varepsilon_p)) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2}}{\frac{\sin^2 \beta}{R_p + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p)}} \quad (54)$$

Окружная скорость валков определяется по выражению:

$$V = \frac{\pi \cdot R_c \cdot n}{30}, \quad (55)$$

где  $R_c$  - средний радиус валка по длине очага деформации;

$n$  - частота вращения валков.

Средний радиус валка можно найти:

$$R_p = \frac{R_1 + R_p + R_2}{3}, \quad (56)$$

где  $R_1$  - радиус валка в сечения первичного захвата;

$R_3$  - радиус валка на выходе из очага деформации.

Радиус валка в сечении первичного захвата определяется по формуле:

$$R_1 = R_p - \left( \frac{\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + (r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))} \cdot r_z \cdot \varepsilon_p - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}}{\frac{\sin^2 \beta}{R_p + (r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))}} \right) \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \quad (57)$$

Радиус валка в сечении выхода из очага деформации:

$$R_2 = R_p - \left( \frac{\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + (r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))} \cdot (r_g - (r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2}}{\frac{\sin^2 \beta}{R_p + (r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))}} \right) \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \quad (58)$$

После соответствующих преобразований получаем выражения для определения критерия эффективности, которое является целевой функцией математической модели процесса прошивки для оптимизации такта прошивки, зависимой от двух управляющих параметров: угла подачи, и относительного обжатия перед носком оправки

$$T(\beta, \varepsilon_p) = \frac{L_z \cdot \lambda \cdot 90 + 90 \cdot \sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_z(1 - \varepsilon_p)} \cdot r_z \cdot \varepsilon_p - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 +}}{\eta_0 \cdot \pi \cdot n \cdot \sin \beta \cdot [3 \cdot R_p - \cos \beta \cdot [(\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_z(1 - \varepsilon_p)} \cdot r_z \cdot \varepsilon_p - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}) \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 +}} \quad (59)$$

$$\frac{+ \sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_z(1 - \varepsilon_p)} \cdot (r_g - r_z(1 - \varepsilon_p)) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2}] \cdot \frac{R_p + r_z(1 - \varepsilon_p)}{\sin^2 \beta}}{+ (\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_z(1 - \varepsilon_p)} \cdot (r_g - r_z(1 - \varepsilon_p)) - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2}) \cdot \operatorname{tg} \alpha_2] \cdot \frac{R_p + r_z(1 - \varepsilon_p)}{\sin^2 \beta}}$$

Коэффициент осевой скорости зависит от многих факторов, и диапазон его изменения высок. Для его определения используют различные эмпирические формулы. Ю. М. Матвеев предложил следующую формулу при прошивке катаной заготовки [36]:

$$\eta_0 = \frac{3,2}{V} + 0,05 \cdot r_z \cdot \varepsilon_p + (0,025 + 0,000135 \cdot d_z) \cdot \beta \quad (60)$$

В дальнейшем используется эта формула, так как она учитывает обжатие в пережиме валков, скорость заготовки, диаметр заготовки и угол подачи.

Также известно, что на скорость прошивки влияние оказывает соотношения диаметра заготовки и диаметра гильзы, но в данной работе рассматривается процесс прошивки при известном сортаменте, то есть диаметр заготовки и размеры гильзы, а также длина заготовки являются известными и постоянными величинами.

Таким образом, критерием оптимизации процесса винтовой прошивки является машинное время прокатки, а независимыми параметрами, оказывающие на него влияние, служат угол подачи  $\beta$  и относительное обжатие в пережиме валков  $\varepsilon_p$ .

### 2.3.1.2 Система ограничений процесса двухвалковой винтовой прошивки

Поскольку в математической модели по оптимизации двухвалковой винтовой прошивки управляющими параметрами являются угол подачи  $\beta$  и относительное обжатие в пережиме валков  $\varepsilon_p$ , то система ограничений описывается относительно этих величин.

Ограничения на относительное обжатие в пережиме валков необходимо связать с ограничениями для относительного обжатия перед носком оправки.

На относительное обжатие перед носком оправки накладывается условия:

1) Условие минимального обжатия, необходимого для преодоления осевого сопротивления оправки. Исходя из опыта работы прошивных станков [80] по прошивке непрерывнолитой заготовки, минимальное обжатие равно  $\varepsilon_{\min.n} = 0,05$ , то есть:

$$\varepsilon_n - 0,05 \geq 0. \quad (61)$$

2) Условие отсутствия чрезмерного разрушения перед носком оправки.

Примем  $\varepsilon_{\max.n} = 0,08$  [80].

$$0,08 - \varepsilon_n \geq 0. \quad (62)$$

Для использования данных ограничений в математической модели найдем зависимость между обжатием перед носком оправки и относительным обжатием в пережиме валков.

Относительное обжатие в пережиме валков и перед носком оправки определяются по системе выражений (63):

$$\begin{cases} \varepsilon_p = \frac{r_z - r_p}{r_z} \\ \varepsilon_n = \frac{r_z - r_n}{r_z} \end{cases}. \quad (63)$$

Радиус перед носком оправки определяется из условия получения заданной толщины стенки гильзы, обеспечивается выдвиганием оправки за пережим валков и расстоянием между валками в пережиме:

$$r_n = \frac{c^2 \cdot \sin \beta^2}{2 \cdot (R_p + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))} + c \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p) \quad (64)$$

Выдвигание оправки за пережим можно получить из следующего выражения:

$$c = \frac{l_{0r} \cdot \sin \beta^2 - \left[ \sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2)^2 + \frac{2 \cdot \sin \beta^2}{(R_p + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))} \cdot (r_{op} + t_g - r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))} - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \right] \cdot (R_p + r_z \cdot (1 - \varepsilon_p))}{\sin \beta^2} \quad (65)$$

Кроме минимального обжатия перед носком оправки необходимо, чтобы заготовка до оправки сделала как минимум  $\frac{3}{4}$  оборота. То есть следующее ограничение имеет вид:

$$\frac{L_p - c}{\pi \cdot 2 \cdot r_z \cdot \operatorname{tg} \beta} - 0,75 \geq 0. \quad (66)$$



Изменение угла подачи оказывает влияние на условия первичного захвата. Совместное рассмотрение условий первичного захвата в осевом и тангенциальном направлении позволило П. К. Тетерину [33] получить следующую зависимость:

$$\varphi_c \leq \frac{2\sqrt{f^2 - \sin^2 \alpha_1}}{1+i}, \quad (67)$$

где  $\varphi_c$  - угол обхвата заготовки, отвечающий за ее вращение и осевое перемещение и приближенно определяемый по уравнению:

$$\varphi_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \beta}{(1+i) \cdot \lambda}}. \quad (68)$$

Таким образом, четвертое ограничение процесса двухвалковой винтовой прошивки имеет вид:

$$\frac{2\sqrt{f^2 - \sin^2 \alpha_1}}{1+i} - \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \beta}{(1+i) \cdot \lambda}} \geq 0. \quad (69)$$

Также необходимым условием для первичного захвата является условие встречи заготовки с рабочей поверхностью вала  $L_{bp}$ :

$$L_{bp} - L_p \geq 0. \quad (70)$$

В разделах 1.1.3 и 2.1 показано значительное влияние на качество гильз коэффициента овализации. В математической модели предельное значение коэффициента овализации составляет  $\xi_{\max} = 1,15$ . Для определения расстояния между линейками используется допущение, что контакт линейки с «заготовкой – гильзы» заканчивается в поперечном сечении очага деформации, где и

прекращается контакт «заготовки – гильзы» с оправкой и дальнейшая деформация происходит практически без изменения вытяжки:

$$1,15 - \frac{2 \cdot r_g - r_{op} - t_g - (l_{or} - c) \cdot \operatorname{tg} \alpha_l}{r_z \cdot (1 - \varepsilon_p)} \geq 0, \quad (71)$$

где  $\alpha_l$  - угол гребня линейки в конусе раскатки.

Обеспечение необходимой точности гильз по наружному диаметру должно отвечать условию: длина очага деформации в конусе раскатки меньше длины бочки валка:

$$L_{bk} - L_r \geq 0. \quad (72)$$

### 2.3.1.3 Способ оптимизации двухвалковой винтовой прошивки и пример расчета

Для определения оптимальных параметров процесса прошивки  $(\beta, \varepsilon_p)$  используется аппарат математического программирования [120].

Задача математического программирования в общем случае состоит в следующем. Дано множество

$$X = \{x : f_i(x) \geq 0, i = 1 \dots m\}, \quad (73)$$

где  $f_i$  - заданные скалярные функции. На этом множестве определена функция  $\varphi(x)$ , минимум которой надо разыскать.

Результаты решения этой задачи могут быть такими:

- 1) точка оптимума будет найдена  $x^{(0)} \in X, \varphi(x^{(0)}) = \min \varphi(x)$ ;
- 2) если нет точки  $x^{(0)}$  в указанном выше смысле, то будет  $x \in X$  найдена  $\varphi^0 = \inf \varphi(x)$ ;

- 3) будет показано, что  $\varphi(x)$  неограниченна снизу, то есть нет ни  $\min \varphi(x)$ , ни  $\inf \varphi(x)$ ;
- 4) может оказаться, что  $X = \emptyset$ , то есть нет ни одной точки, которая была бы определена условиями

В качестве способа оптимизации выбран градиентный метод.

Идея данного метода следующая. Выбирается из заданного множества некоторое значение  $x = x^1$ . Затем проверяется - выполняется ли для множества  $X$ , ограничения  $f_i(x^1) \geq 0$ .. Если не выполняется, то надо выбрать новое значение точки до тех пор пока не выполнится условие по ограничению.

В точке  $x^1$  осуществляется «планируемый эксперимент», в котором функцию отклика определяют не экспериментально, а вычисляют по заданному выражению  $\varphi(x)$ . Полученное уравнение следующего линейного вида (74) является приближенным уравнением касательной плоскости к поверхности  $\varphi(x)$  в точке  $x^1$ :

$$\varphi(x) = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 \quad (74)$$

Полученные коэффициенты регрессии  $a_1, a_2$  - приближенно являются координатами вектора градиента плоскости. Осуществляется спуск по линии градиента до некоторой точки  $x^{(2)}$ , в которой все повторяется, как и в точке  $x^{(1)}$ . Так достигается окрестность точки оптимума (если она существует).

Ниже приведен пример решения оптимизационной задачи, для получения гильз наружным диаметром 428 мм из заготовки диаметром 410 мм на бочковидном стане. В таблице 5 представлены исходные данные для расчета.

Таблица 5 – Исходные данные для оптимизации винтовой прошивки

Диаметр Заготовки, мм	Длина заготовки, мм	Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки, мм	Радиус валка в пережиме, мм	Угол входного конуса валка, град	Угол выходного конуса валка, град	Рабочая длина валка в конусе прошивки, мм	Рабочая длина валка в конусе раскатки, мм	Частота вращения валков, об/мин.	Диаметр оправки, мм	Рабочая длина оправки, мм
410	2000	428	30,5	650	3 <sup>0</sup>	3 <sup>0</sup> 30'	545	575	80	347	552

В таблице 6 представлены результаты расчета по определению минимального времени прошивки заготовки диаметром 410 мм в гильзу 428x30,5 мм.

Таблица 6 – Результаты расчета

Точка из множества возможных значений управляющих параметров	Граничные условия						
	По осевому втягиванию и вращению	По условию вторичного захвата для угла подачи	По условию вторичного захвата для обжатия перед носком оправки	По условию уменьшение вероятности разрушения	По условию допустимого коэффициента овализации	По условию достаточности длины бочки в конусе прошивки	По условию достаточности длины бочки в конусе раскатки
$T(\beta_0^0=4, \varepsilon_0^0=0,12)=59,2$	0,084 > 0	0,141 > 0	0,016 > 0	0,32 > 0	0,02 > 0	42 > 0	15 > 0
$T(\beta_{\min}^0=3,9, \varepsilon_{\min}^0=0,11)=61,1$	0,084 > 0	0,142 > 0	0,012 > 0	0,38 > 0	0,03 > 0	55 > 0	16 > 0
$T(\beta_{\max}^0=4,1, \varepsilon_{\min}^0=0,11)=58,1$	0,084 > 0	0,139 > 0	0,012 > 0	0,36 > 0	0,03 > 0	58 > 0	17 > 0
$T(\beta_{\min}^0=3,9, \varepsilon_{\max}^0=0,13)=61,8$	0,084 > 0	0,144 > 0	0,018 > 0	0,28 > 0	0,02 > 0	30 > 0	4 > 0
Коэффициенты регрессии: $a_0=28,64, a_1=-0,240, a_2=-9,95, \beta_0^1=6, \varepsilon_0^1=\frac{-0,240}{-9,95} \cdot 6=0,144$							
$T(\beta_0^1=6, \varepsilon_0^1=0,144)=38,6$	0,102 > 0	0,110 > 0	0,044 > 0	0,120 > 0	0,01 > 0	68 > 0	25 > 0
$T(\beta_{\min}^1=5,9, \varepsilon_{\min}^1=0,134)=39,6$	0,102 > 0	0,110 > 0	0,022 > 0	0,148 > 0	0,02 > 0	74 > 0	36 > 0
$T(\beta_{\max}^1=6,1, \varepsilon_{\min}^1=0,134)=31$	0,102 > 0	0,106 > 0	0,022 > 0	0,140 > 0	0,02 > 0	76 > 0	38 > 0
$T(\beta_{\min}^1=5,9, \varepsilon_{\max}^1=0,154)=40,9$	0,102 > 0	0,110 > 0	0,057 > 0	0,116 > 0	0,01 > 0	67 > 0	12 > 0
Коэффициенты регрессии: $a_0=69,24, a_1=-0,56, a_2=-43,0, \beta_0^2=10, \xi_0^2=\frac{-0,52}{-43,0} \cdot 10=0,12$							
$T(\beta_0^2=10, \xi_0^2=0,12)=26,8$	0,125 > 0	<b>0,0012 &gt; 0</b>	0,028 > 0	0,123 > 0	0,02 > 0	92 > 0	53 > 0
$T(\beta_{\min}^2=9,9, \xi_{\min}^2=0,11)=28,2$	0,125 > 0	<b>0,0012 &gt; 0</b>	0,022 > 0	0,123 > 0	0,03 > 0	103 > 0	72 > 0
$T(\beta_{\max}^2=10,1, \xi_{\min}^2=0,11)=25,6$	0,125 > 0	<b>0,0007 &gt; 0</b>	0,022 > 0	0,120 > 0	0,03 > 0	105 > 0	75 > 0
$T(\beta_{\min}^2=9,9, \xi_{\max}^2=0,13)=28,8$	0,125 > 0	<b>0,0012 &gt; 0</b>	0,035 > 0	0,116 > 0	0,01 > 0	79 > 0	40 > 0

По результатам расчета получено, что оптимальными параметрами являются угол подачи  $\beta = 10,1^\circ$  и относительное обжатие в пережиме  $\varepsilon_p = 0,11$ , так как данная точка находится в окрестности ограничения по условию вторичного захвата для угла подачи. Минимальное время прошивки составляет  $T_{\min} = 25,66$  с. Так как интервал изменения угла подачи на прошивных станках  $0,5^\circ$ , примем оптимальное значение при угле подачи  $\beta = 10^\circ$  и относительном обжатии в пережиме  $\varepsilon_p = 0,12$ . Точка с координатами  $T(\beta = 10^\circ; \varepsilon_p = 0,12)$  удовлетворяет граничным условиям и обеспечивает  $T_{\min} = 26,2$  с.



$$p_{cp} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left( 1 + 3 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot \frac{\sin \frac{\alpha}{4}}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right), \quad (75)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление деформации стали;

$\alpha$  – полуугол клина в продольном сечении.

Сопротивление деформации стали определяется по опытным зависимостям вида:

$$\sigma_s = a_0 \cdot u_c^{a_1} \cdot \varepsilon_1^{a_2} \cdot e^{a_3 \cdot t}, \quad (76)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – эмпирические коэффициенты;

$u_c$  – скорость деформации;

$\varepsilon_1$  – логарифмическая степень деформации:

$$\varepsilon_1 = \ln \left( \frac{d_3^2}{d_3^2 - 2 \cdot d_3 \cdot d + d^2} \right), \quad (77)$$

где  $d_3$  – диаметр заготовки;

$d$  – диаметр центровочного отверстия;

$t$  – температура нагрева металла.

Полная сила внедрения клина складывается из двух составляющих: работой сил среза по линиям скольжения и работой сил среза по площадкам ABC, ACD, ADE (Рисунок 26).

$$P = P_1 + P_2. \quad (78)$$

Первая составляющая силы внедрения для клина вычисляется по выражению:

$$P_1 = p_{cp} \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4}, \quad (79)$$

где  $d$  – диаметр основания конуса бойка зацентровщика.

$$d = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (80)$$

Вторая составляющая силы внедрения вычисляется по выражению:

$$P_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \tau_s \cdot h \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot \left( 1 + \frac{\sin \alpha}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right), \quad (81)$$

где  $\tau_s = 0,577 \cdot \sigma_s$  – сопротивление металла пластической деформации сдвига.

На усилие зацентровки влияют угол конусности бойка зацентровщика и глубина его внедрения в тело заготовки. Следовательно, они и будут управляющими параметрами, оказывающими влияние на усилие зацентровки.

После соответствующих преобразований получена целевая функция для оптимизации операции зацентровки:

$$P(\alpha, h) = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left( 1 + 3 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot \frac{\sin \frac{\alpha}{4}}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right) \cdot \pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \tau_s \cdot h^2 \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot \left( 1 + \frac{\sin \alpha}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right) \quad (82)$$

### 2.3.2.2 Система ограничений для операции «передняя зацентровка»

В систему ограничений входят следующие условия:

1. Перед носком оправки создается область подпрессовки металла, приблизительно равная половине диаметра носка. Поэтому целесообразно принять максимальное расстояние между дном отверстия и носком оправки, равное радиусу носка оправки (рисунок 27).

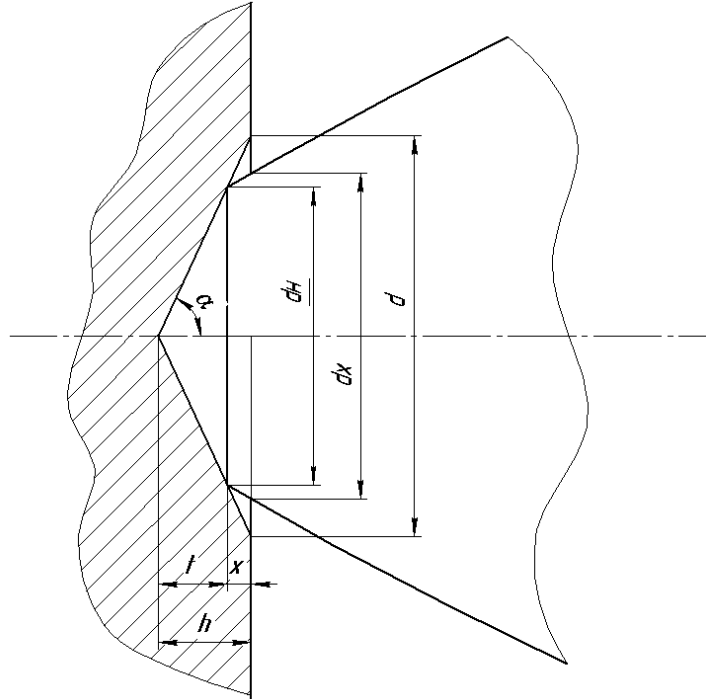


Рисунок 27 – Схема для определения соотношения между диаметром центровочного отверстия и носком оправки

$$\frac{d_n}{2} - t \geq 0. \quad (83)$$

2. Из предыдущего ограничения вытекает, что  $t_{\max} = \frac{d_n}{2}$ , следовательно  $\operatorname{tg} \alpha \geq 1$ . Таким образом, минимальный угол должен превышать  $45^\circ$ .

$$\alpha_{\min} - 45^\circ \geq 0. \quad (84)$$

3. Из геометрических соображений максимальный угол должен быть меньше  $90^\circ$ .

$$90^\circ - \alpha_{\max} > 0. \quad (85)$$



4. Глубина отверстия должна компенсировать искривление торца заготовки (утяжина), образующееся на ее переднем конце до встречи с оправкой. Принимаем минимальную глубину зацентровки 20 мм, то есть:

$$h_{\min} - 20 \geq 0. \quad (86)$$

5. Расстояние между основанием отверстия и носком оправки не должно превышать четверти шага заготовки, в противном случае зацентровочное отверстие будет являться концентратором разрушений.

Следовательно, общая высота отверстия должна удовлетворять условию

$$\frac{d_n}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} + 0,25 \cdot \pi \cdot d_3 \cdot \operatorname{tg} \beta - h_{\max} \geq 0, \quad (87)$$

где  $d_n$  – диаметр носка оправки, мм;

$\alpha$  – половина угла конусности зацентровочного отверстия;

$d_3$  – диаметр заготовки, мм;

$\beta$  – угол подачи.

6. Ввиду того, что конец стержня, на который насажена оправка, отклоняется от оси прошивки (из-за прогиба стержня), для попадания носка оправки в зацентровочное отверстие, по имеющимся данным [16], его диаметр должен превышать диаметр оправки в сечении основания отверстия более, чем на 20 мм.

$$d - d_x - 20 \geq 0 \quad (88)$$

### 2.3.2.3 Способ оптимизации операции «передняя зацентровка» и пример расчета

При определении оптимальных параметров  $(\alpha, h)$  операции «передняя зацентровка», при которых достигается минимум целевой функции (82) на заданном множестве, описывающейся системой ограничения (определенной в пункте 2.3.2.2), использован классический метод Гаусса–Зейделя [122].

Данный метод основан на последовательном изменении значения одного фактора и последующем фиксировании наилучшего значения этого фактора. В этих условиях последовательно изменяются значения второго фактора (рисунок 28).

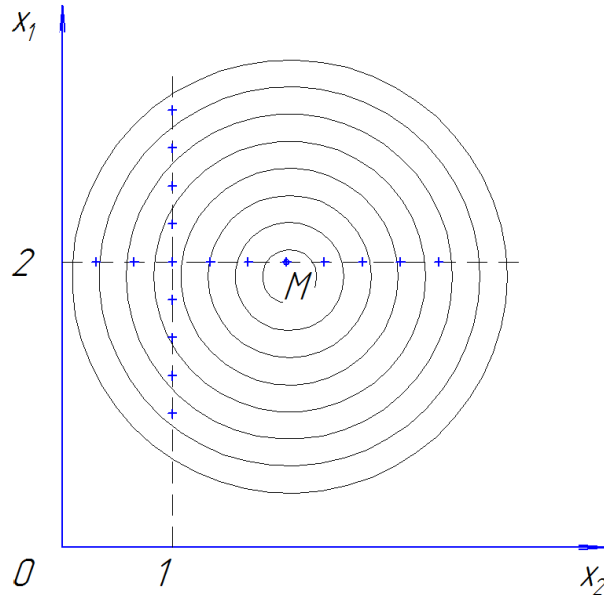


Рисунок 28 – Метод Гаусса-Зейделя

Как видно из целевой функции (82) на величину усилия зацентровки прямо пропорционально влияет глубина зацентровки. Следовательно, минимум усилия зацентровки будет достигаться при минимальной ее высоте. Однако, высота зацентровки должна удовлетворять граничным условиям (86) и (87). Также высота ограничивается условием (88), поскольку диаметр отверстия и диаметр оправки в сечении основания отверстия зависят от  $\alpha$  и  $h$ :

$$d_{\text{отв}} = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (89)$$

$$d_x = 2 \cdot \left( \sqrt{R^2 - (R \cdot \sin \varphi_k + L_0 - x)^2} - R \cdot \cos \varphi_k + r_k \right), \quad (90)$$

где  $R$  – радиус образующей обжимного участка оправки (рисунок 29);

$\varphi_k$  – угол конусности калибрующего участка оправки;

$r_k$  – радиус оправки в начале калибрующего участка;

$L_0$  – длина обжимного участка оправки;

$x$  – расстояние от носка оправки до основания зацентровочного отверстия, определяемое по формуле:

$$x = h - \frac{d_n}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (91)$$

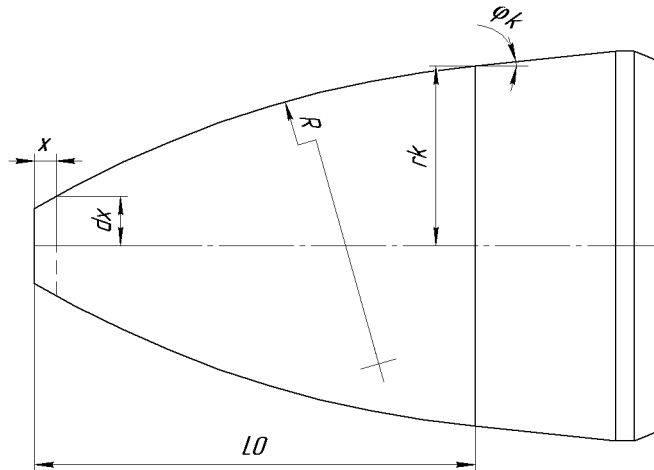


Рисунок 29 – Геометрические параметры оправки, используемые в расчетах

Подставив в (88) выражения (89), (90), (91) и, решив относительно высоты зацентровочного отверстия  $h$ , получим

$$\begin{aligned}
h \geq & \frac{-2 \cdot \left( (R \cdot \cos \phi_k - r_k - 10) \cdot \operatorname{tg} \alpha - \left( R \cdot \sin \phi_k + L_0 - \frac{d_n}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \right)}{2 \cdot ((\operatorname{tg} \alpha)^2 + 1)} \times \\
& + \sqrt{\frac{2 \cdot \left( (R \cdot \cos \phi_k - r_k - 10) \cdot \operatorname{tg} \alpha - \left( R \cdot \sin \phi_k + L_0 - \frac{d_n}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \right)^2}{2 \cdot ((\operatorname{tg} \alpha)^2 + 1)}} - \\
& \times \sqrt{\frac{-4 \cdot ((\operatorname{tg} \alpha)^2 + 1) \cdot \left( R^2 + (R \cdot \cos \phi_k - r_k - 10)^2 + \left( R \cdot \sin \phi_k + L_0 - \frac{d_n}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right)^2 \right)}{2 \cdot ((\operatorname{tg} \alpha)^2 + 1)}}
\end{aligned} \quad (92)$$

Если в неравенстве (92) приравнять левую и правую части, то при заданном угле  $\alpha$ , с учетом граничных условий, вычисляется минимальная высота зацентровочного отверстия  $h_{\min}$ .

Следовательно, для более быстрого решения оптимизационной задачи методом Гаусса-Зейделя в данном случае необходимо вычислить усилия зацентровки при углах из поля допустимых значений с заданным шагом варьирования и минимальной высоте отверстия, соответствующей этому углу по выражению (92). Таким образом, граничное условие 6 запишется следующим образом:

$$f_6(\alpha, h) = 0. \quad (93)$$

Система ограничений примет вид:

$$\begin{cases} f_1(\alpha, h) \geq 0 \\ f_2(\alpha, h) \geq 0 \\ f_3(\alpha, h) > 0 \\ f_4(\alpha, h) \geq 0 \\ f_5(\alpha, h) \geq 0 \end{cases} \quad (94)$$

Ниже приведен пример решения оптимизационной задачи операции «передняя зацентровка» заготовки 410 мм. Шаг варьирования по углу принят

равным  $5^\circ$ . Для расчета  $h_{\min}$  использованы параметры оправки АО «ВТЗ». В таблице 7 изображены параметры оправки, необходимые для решения оптимизационной задачи.

Таблица 7 – Параметры оправки АО «ВТЗ»

Радиус образующей обжимного участка оправки R, мм	Угол конусности калибрующего участка оправки $\varphi_k$ , град	Длина обжимного участка оправки L0, мм	Радиус оправки в начале калибрующего участка $r_k$ , мм	Диаметр носка оправки $d_n$ , мм
1198,35	6	470	191,75	80

В таблице 8 представлены результаты расчетов по решению оптимизационной задачи операции «передняя зацентровка».

Таблица 8 – Результаты расчетов по решению оптимизационной задачи

Управляющие параметры		Значение целевой функции P( $\alpha, h$ ), МН	Граничные условия				
$\alpha$ , град	h, мм		$f_1(\alpha, h) \geq 0$	$f_2(\alpha, h) > 0$	$f_3(\alpha, h) \geq 0$	$f_4(\alpha, h) \geq 0$	$f_5(\alpha, h) \geq 0$
45	63,25	3,23	0	0	45	43,25	22,00
50	49,78	2,92	6,4	5	40	29,78	29,04
55	39,78	2,79	12,0	10	35	19,78	33,48
60	31,78	2,69	17,0	15	30	11,78	36,57
<b>65</b>	<b>25,06</b>	<b>2,67</b>	<b>21,3</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>5,06</b>	<b>38,85</b>
70	19,19	2,69	25,4	25	20	-0,81	40,62
75	13,90	2,73	29,2	30	15	-6,10	42,07
80	9,02	2,79	32,3	35	10	-10,98	43,29
85	4,42	2,85	36,5	40	5	-15,58	44,34

Из таблицы 8 видно, что, минимальное значение целевой функции в точке, удовлетворяющей граничным условиям, достигается при угле  $65^\circ$  и высоте отверстия приблизительно равной 25 мм.

## 2.4 Выводы по второй главе

1. Моделирование винтовой прошивки на базе метода конечных элементов позволило объяснить характер напряженно-деформированного состояния металла при винтовой прокатке за один оборот заготовки, а также подтвердить гипотезу о влиянии подпирющих сил со стороны оправки на характер напряженно-деформирования заготовки и определить влияние коэффициента овализации и угла подачи на уровень осевых растягивающих напряжений в центральной зоне заготовки.

2. Разработаны математические зависимости очага деформации, учитывающие искажение очага деформации на угол подачи и раскатки. Новые зависимости позволяют определить расстояния от оси прокатки до поверхности валков в любом поперечном сечении очага деформации при двухвалковой винтовой прошивке.

3. На базе новых математических выражений разработана методика определения настроечных параметров процесса двухвалковой винтовой прошивки, которая позволяет позиционировать прокатный инструмент прошивного стана с учетом искажения очага деформации на угол подачи и раскатки.

4. Для получения более точной гильзы из заготовок повышенного диаметра разработана математическая модель проектирования линеек прошивного стана.

5. Разработана математическая модель, предназначенная для проектирования калибровки оправок прошивного стана. Данная методика позволяет повысить точность по внутреннему диаметру гильзы и толщине стенки.

6. Решена оптимизационная задача по минимизации машинного времени винтовой прошивки.

7. Решена оптимизационная задача по минимизации усилия операции зацентровки заготовки.



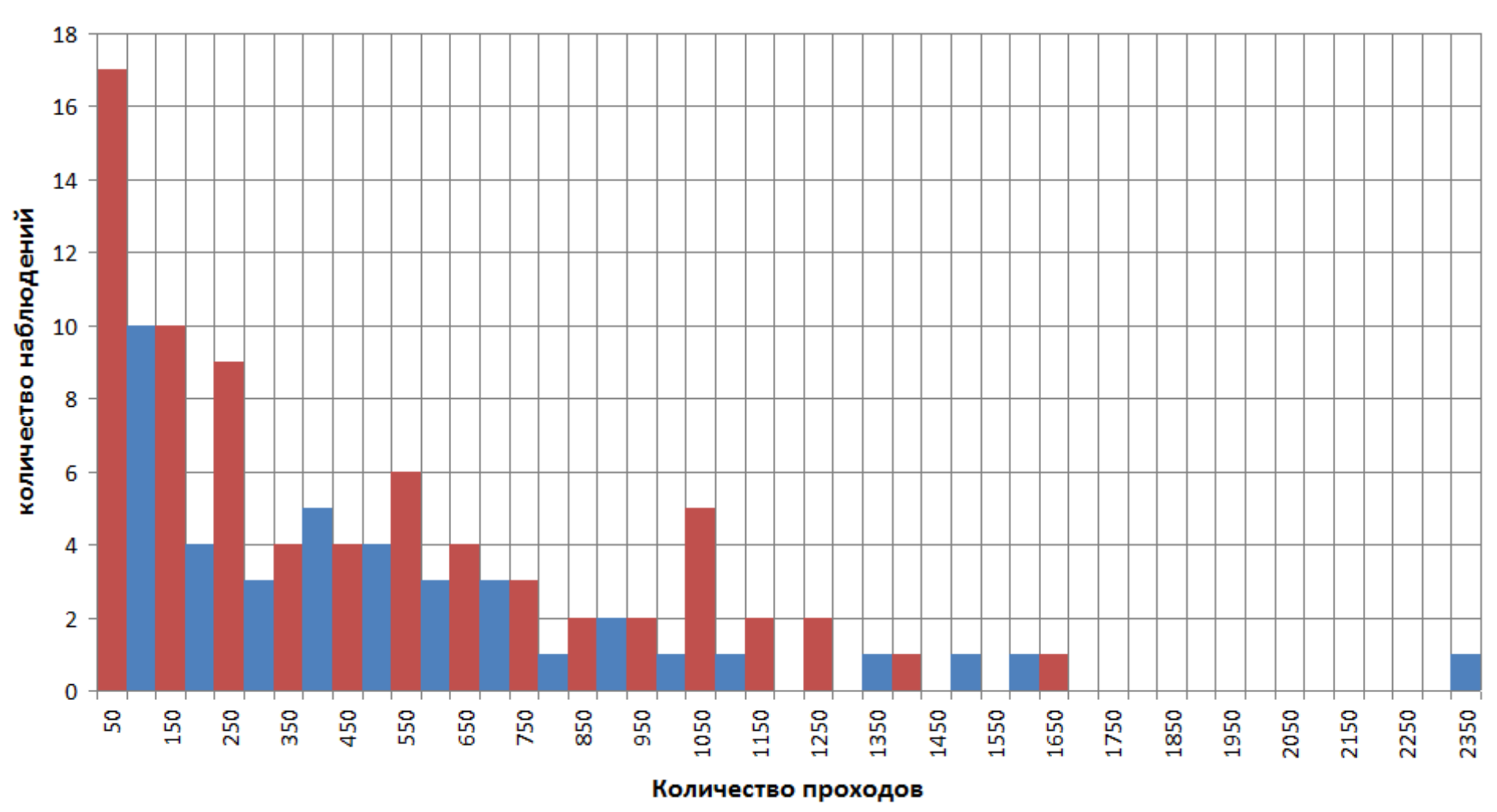


Рисунок 30 – Гистограмма стойкости оправок прошивного стана



Относительная частота стойкости оправок является эмпирической функцией распределения (функцией распределения выборки). Так как количество наблюдений достаточно высокое, то для последующего анализа целесообразно использовать эмпирическую функцию распределения выборки для приближенного представления теоретической функции распределения.

На рисунке 31 показан график эмпирической функции распределения. Так как функция не имеет яркого выраженного купола и имеет убывающий характер, то предполагается, что стойкость оправок имеет показательное (экспоненциальное) распределение.

При показательном распределении математическое ожидание равно среднеквадратичному отклонению и вычисляется по формуле:

$$M = \bar{x} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot x_i, \quad (96)$$

где  $\bar{x}$  – выборочное средневзвешенное количество проходов на одной оправке.

В результате проведенного расчета величина средневзвешенного количества проходов на одной оправке составила  $\bar{x} = 476$ .

Для проверки гипотезы о показательном распределении стойкости оправок необходимо оценить согласованность выбранного теоретического распределения со статистической выборкой данных в соответствии с критерием Пирсона. Для этого необходимо найти кривую для теоретического показательного распределения, имеющую следующий вид:

$$f^T(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x}, \quad (97)$$

где  $x$  - число проходов на одной оправке;

$\lambda$  - постоянный положительный параметр показательного распределения.

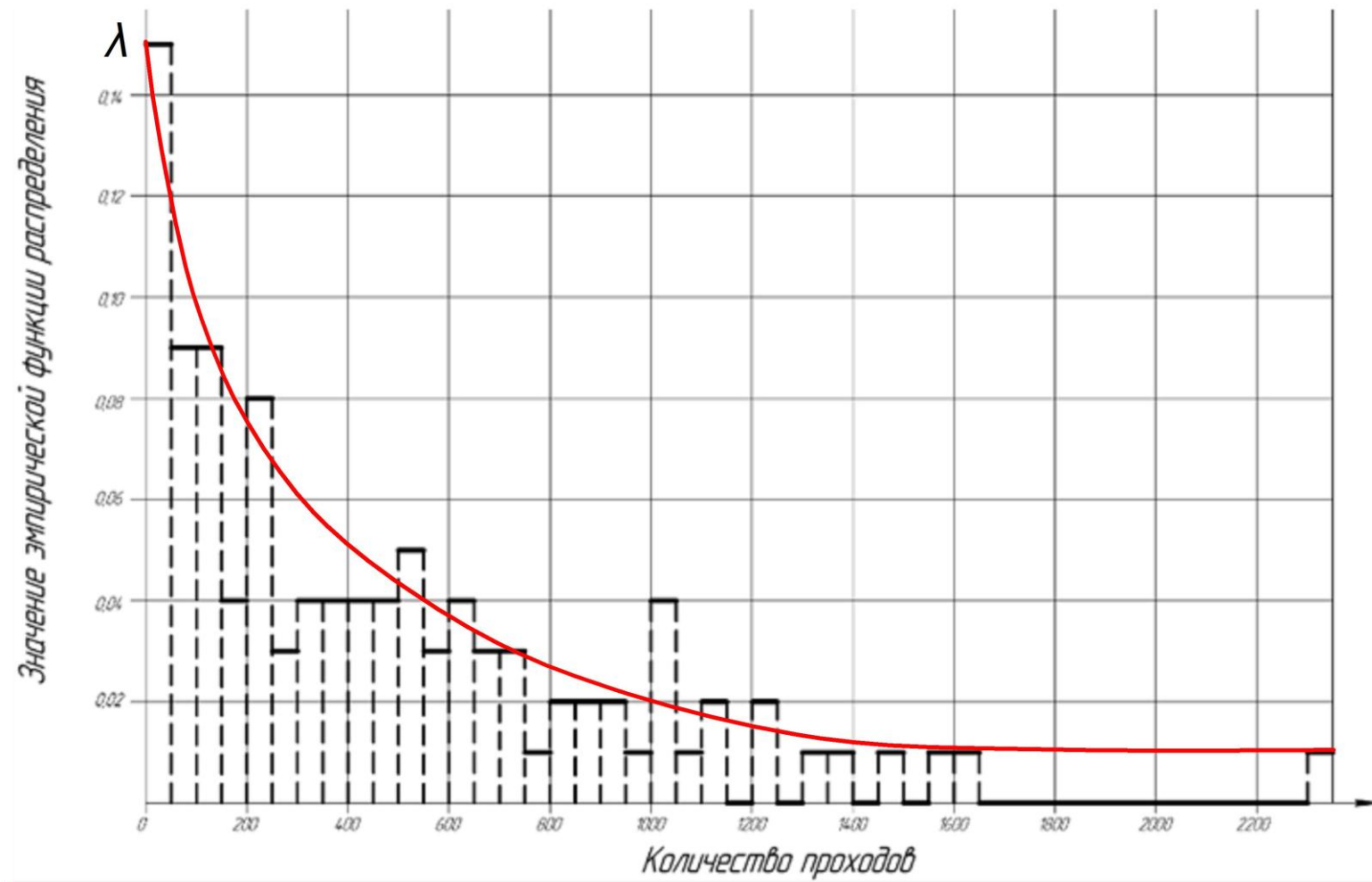


Рисунок 31 – График эмпирической функции распределения

Для показательного распределения параметр  $\lambda$  на основании метода моментов вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{x}} = \frac{1}{M}. \quad (98)$$

Таким образом, теоретическая кривая описывается функцией:

$$f^T(x) = \begin{cases} 0 & \text{если } x < 0 \\ \frac{1}{476} \cdot e^{-\frac{1}{476}x} & \text{если } x \geq 0 \end{cases}. \quad (99)$$

Критерий Пирсона определяется по следующему выражению:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n \cdot h \cdot f^T(x_i))^2}{n \cdot h \cdot f^T(x_i)}, \quad (100)$$

где  $k$  - количество частичных интервалов, равное 30 .

В результате проведенного расчета критерий Пирсона равен  $\chi^2 = 17,21$ . Для оценки согласованности выбранного теоретического показательного распределения со статической выборкой данных определено табличное значение критического критерия Пирсона. При заданном уровне значимости 90 % и степени свободы равной  $\nu = 30 - 2 = 28$  критическое значения критерия Пирсона равно  $\chi_{ik}^2 = 18,94$ . Поскольку  $\chi^2 < \chi_{ik}^2$ , то гипотеза о показательном распределении стойкости оправок прошивного стана с вероятностью 90% подтверждается. Показательное распределение количества проходов на одной оправке свидетельствует о высоком уровне рассеянности данных по стойкости оправок.

### 3.2 Анализ факторов, влияющих на стойкость оправок

Для анализа стойкости оправок в качестве факторов были выбраны: длина гильзы, диаметр оправки, режимы деформирования, форма оправки, машинное время прошивки.

На рисунке 32 показана диаграмма стойкости оправок в зависимости от средней длины получаемых гильз.

Из анализа диаграммы следует, что большая стойкость оправок наблюдается при прошивке гильз длиной 6 и 8 метров (рисунок 32).

Резкое уменьшение количества проходов на одной оправке происходит при прошивке гильз длиной выше 9 метров. Увеличение длины гильзы приводит к более длительному контакту оправки с прошиваемым металлом в очаге деформации и поверхность оправки сильно нагревается.

Общепринято, что с увеличением длины гильз стойкость оправок уменьшается, так как увеличивается время контакта металла заготовки – гильзы с оправкой. Большая стойкость оправок (гильзы длиной 6 - 8 метров), видимо, связана с влиянием других факторов: формы оправки, величины обжатия в пережиме, вытяжки, цикличности термических напряжений. При прокатке относительно «коротких» гильз цикличность термических напряжений на поверхности достаточно высокая, что возможно и приводит к интенсификации износа оправок.

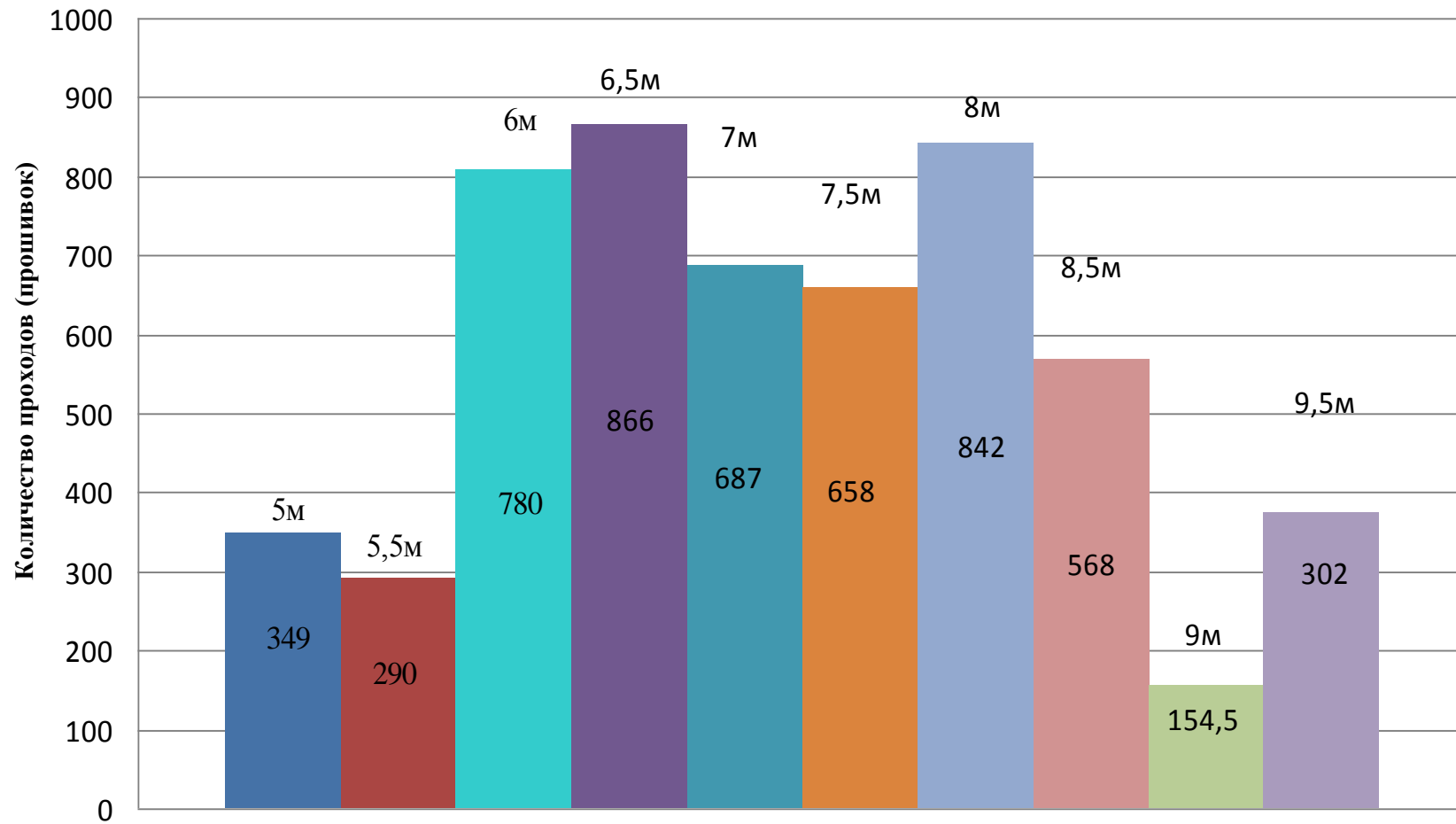


Рисунок 32 – Диаграмма средней стойкости оправок прошивного стана в зависимости от длины получаемых гильз

Для определения влияния диаметра оправки на ее стойкость построена диаграмма стойкости оправок в зависимости от количества проходов на одной оправке от ее диаметра (рисунок 33).

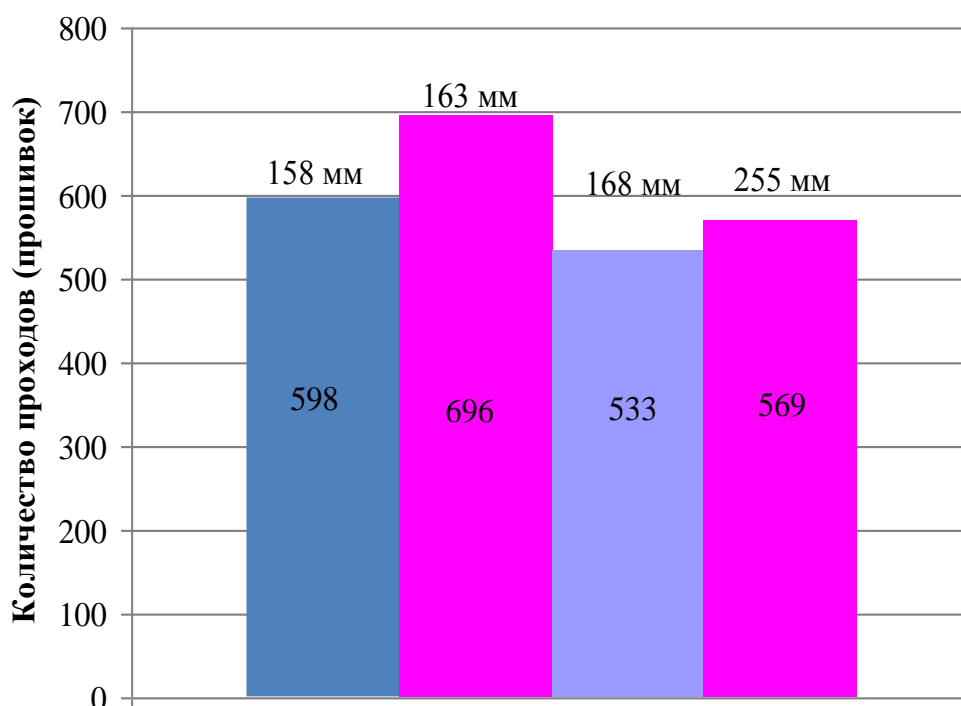


Рисунок 33 – Диаграмма средневзвешенных количеств проходов на одной оправке в зависимости от диаметра оправок.

Как видно из диаграммы 33 средняя стойкость оправок на исследуемом прошивном стане в зависимости от диаметра оправки изменяется не значительно, что говорит о не существенном влиянии диаметра оправки. Скорей всего на характер изменения стойкости оправок на данном прошивном стане оказывают влияние режимы прошивки и форма оправки.

Одним из основных показателей калибровки оправок является отношения длины рабочей поверхности к диаметру оправки  $L_{раб} / D_{опр}$ . Чем больше это отношение, тем более равномерно распределено обжатие по длине оправки, и, следовательно, должна быть выше ее стойкость. В таблице 10 представлено отношение длины рабочей поверхности оправки к ее диаметру  $L_{раб} / D_{опр}$ .

Таблица 10 – Отношение длины рабочей поверхности оправки к ее диаметру

Диаметр оправки, $D_{опр}$ мм	255	168	163	158
Длина рабочей поверхности $L_{раб}$ , мм	560	330	330	350
Отношение длины рабочей поверхности к диаметру оправки $L_{раб} / D_{опр}$	2,19	1,96	2,02	2,21

Из таблицы 10 следует, что с увеличением диаметра оправки отношение длины рабочей поверхности оправки к диаметру уменьшается, то есть должна уменьшаться стойкость оправки за счет повышения степени деформации на рабочем участке оправки. Исключение составляет оправка диаметром 255 мм, так как данная оправка служит для получения гильз по технологической схеме, отличающейся от оправок диаметрами 168 мм, 163 мм и 158 мм. С другой стороны, увеличение диаметра оправки должно увеличивать ее эксплуатационный срок службы за счет увеличения объема и массы оправки. Как видно из рисунка 33, количество прошивок на оправке диаметром 163 мм выше, чем у оправок диаметром 158 мм, следовательно, большая стойкость скорее всего связано с увеличением объема и массы оправки. Стойкость оправок диаметром 168 мм наименьшая из сравниваемых типов оправок, в тоже время данная оправка имеет наименьшее отношение  $L_{раб} / D_{опр} = 1,96$ . В данном случае стойкость оправки уменьшается за счет повышенной деформации на рабочем участке оправки.

Таким образом, стойкость оправок зависит от действия перечисленных взаимоисключающих факторов и, в частности, от того, какой из данных факторов окажется преобладающим.

Некоторое снижение стойкости оправок большего диаметра по сравнению с оправками меньшего диаметра связано и с различием деформации на рабочем конусе. В таблице 11 представлен диапазон изменения вытяжки на данных оправках.

Таблица 11 – диапазон изменения вытяжек при прошивке на оправках

Диаметр оправки, мм	255	168	163	158
Диапазон вытяжек	3,11 – 3,36	3,05 – 3,33	2,51 – 2,77	2,13

Увеличение деформации на прошивном стане приводит к интенсивному увеличению прироста температуры в центральной зоне «заготовки – гильзы». Известно, что степень деформации оказывает наибольшее и существенное влияние на прирост температуры на внутренней поверхности гильзы, чем другие факторы.

Увеличение прироста температуры за счет деформации связано и со схемой деформирования заготовки на прошивном стане. Одна и та же гильза при разной настройке прошивного стана имеет различное значение частного обжатия, которое зависит от калибровки оправок (длина рабочей поверхности и угол конусности оправки), расстояния между валками в пережиме, расположения оправки в очаге деформации.

В таблице 12 представлены основные настроечные параметры процесса прошивки из заготовок диаметрами 210 мм и 300 мм.

Таблица 12 – Основные настроечные параметры процесса прошивки из заготовок диаметрами 210 мм и 300 мм

Размеры гильзы $D_r-S_r$ , мм	Относительное обжатие перед носком оправки $\varepsilon_i$ , %	Выдвигание оправки за пережим $s$ , мм	Относительное обжатие в пережиме валков, $\varepsilon_i$ , %	Расстояние между валками в пережиме $a$ , мм	Расстояние между дисками $b$ , мм	коэффициент овализации в пережиме $\xi_i$	Угол подачи и $\beta$ , град
222-16,1	7,4	99,00	14,0	180,46	207,8	1,152	12
222-17,7	7,5	82,00	13,3	182,09	207,83	1,141	12
222-19,7	7,5	92,00	13,4	181,81	207,87	1,143	12
222-22	7,5	68,00	12,3	184,15	207,94	1,129	12
222-26,5	7,5	62,76	11,9	184,92	208,06	1,125	12
222-33,3	7,5	46,31	11,1	186,65	208,27	1,116	12
328-18,7	6	164,00	13,4	259,69	296,69	1,142	10
328-20,1	6	149,00	12,9	261,10	296,71	1,136	10
328-21,9	6	173,00	13,0	260,91	296,73	1,137	10
328-23,8	6	154,00	12,4	262,84	296,77	1,129	10
328-34,5	6	113,00	11,5	265,60	297,03	1,118	10



Из таблицы 12 следует, что у более тонкостенных гильз обжатие в пережиме и коэффициент овализации более высоки. Значит, на оправках большего диаметра уровень внеконтактной деформации выше, больше давление на оправку со стороны металла и происходит больший прирост температуры.

При определении влияния на стойкость оправок скоростного режима процесса прошивки по известной методике [78] было определено среднее машинное время прошивки заготовок.

На рисунке 34 представлена диаграмма стойкости оправок в зависимости от машинного времени прошивки.

Как следует из рассмотрения рисунка 34, машинное время является не значимым фактором. Это связано с тем, что машинное время зависит не только от скорости прошивки, но и от схемы деформирования, развеса заготовки, степени деформации.

Таким образом, проведенный анализ по выявлению наиболее значимых факторов, определяющих стойкость оправок в условиях работы прошивного стана Дишера ПАО «ТАГМЕТ» – размер оправок, режимы деформирования, машинное время прошивки – не представил возможным определить явного превалирующего действия каждого из них. Наиболее значимое влияние на стойкость оправок оказывают совместное сочетание вышеперечисленных факторов.

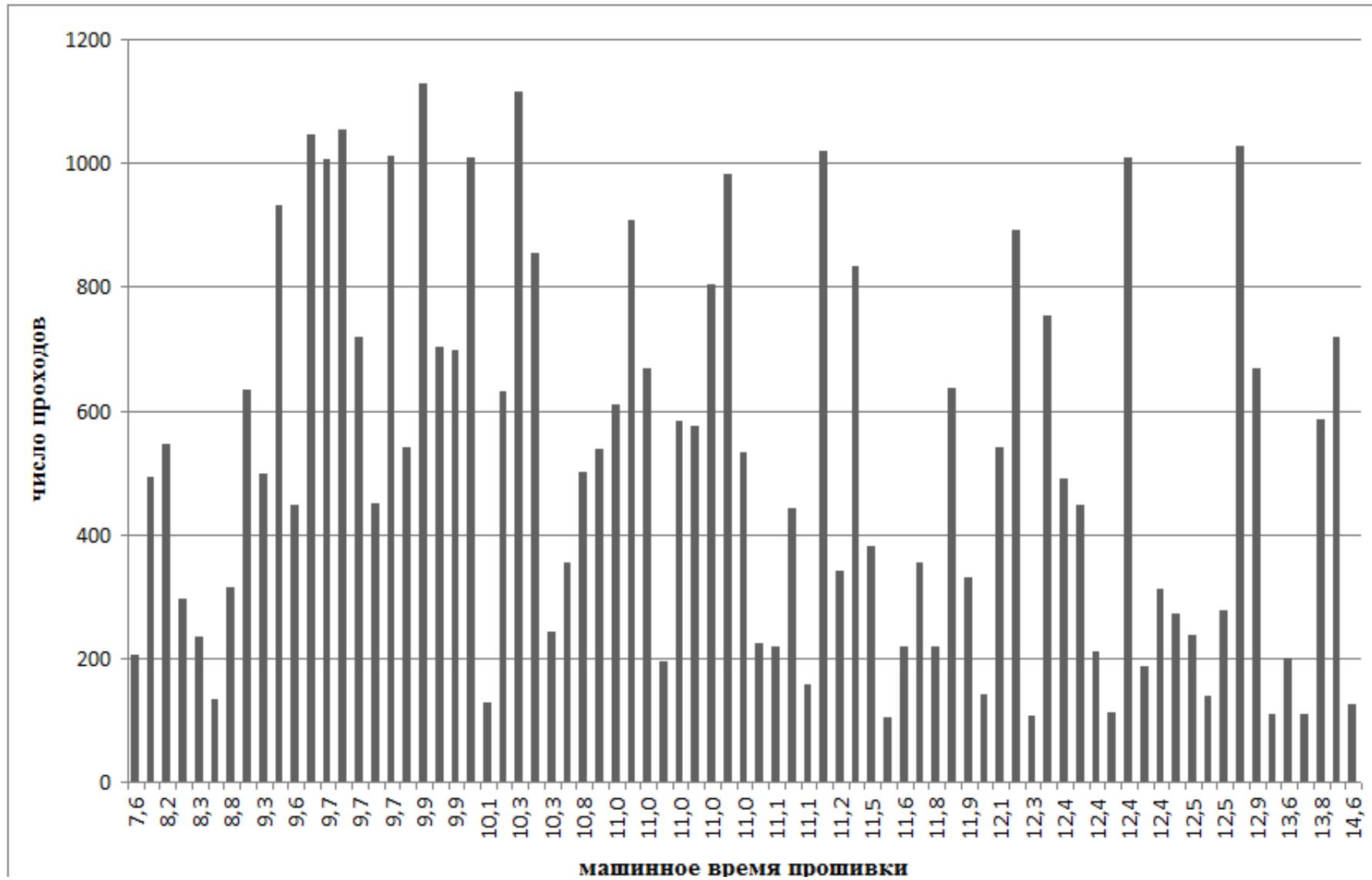


Рисунок 34 – Диаграмма средней стойкости оправок прошивного стана в зависимости от машинного времени прошивки

### 3.3 Новая форма рабочей поверхности оправки

Наименее затратным и перспективным направлением, способствующим повышению стойкости оправок, является совершенствование формы рабочей поверхности. Поэтому новое техническое решение [125, 126] – это увеличение стойкости сферических оправок за счет снижения давления металла и уменьшения разогрева на более нагруженном участке оправки при помощи изменения формы ее сферической рабочей поверхности.

Известно, что наиболее тяжелые условия работы оправки возникают во входном конусе очага деформации, а именно, на участке прошивки заготовки оправкой и деформирования заготовки-гильзы, расположенном между сечениями начала вторичного захвата и пережима валков (рисунок 35).

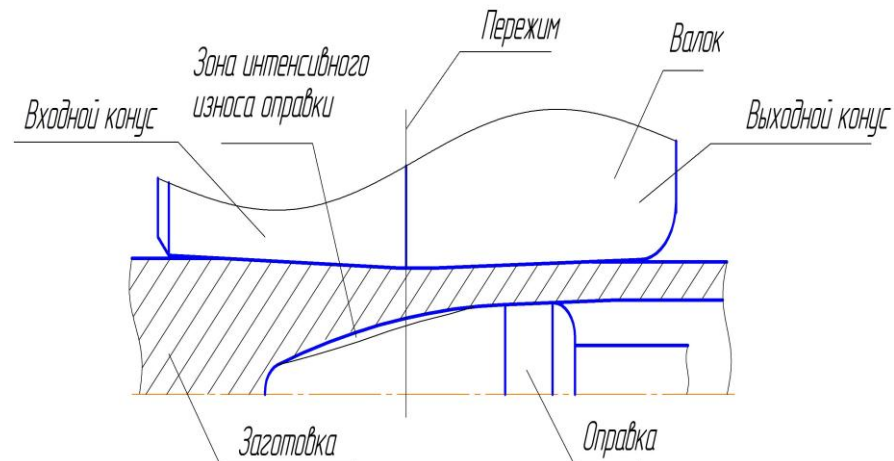


Рисунок 35 – Схема очага деформации при прошивке

На данном участке процесс деформирования заготовки происходит в интенсивно сужающемся калибре, образованном валками, линейками и оправкой, с преодолением лобового сопротивления со стороны прокатного инструмента. Поэтому процесс прошивки характеризуется развитием и поцикловым накоплением внеконтактной поперечной деформации, повышенным давлением металла на инструмент, интенсивным скольжением, разогревом неподвижного инструмента трения: оправки и линейек, с развитием негативных явлений, ускоряющих износ последних.

На выходном конусе очага деформации начинается интенсивное уменьшение накопления внеконтактной деформации.

Для снижения усилия, действующего со стороны металла на оправку, и цикличности процесса предложена новая форма оправки, представленная на рисунке 36 .

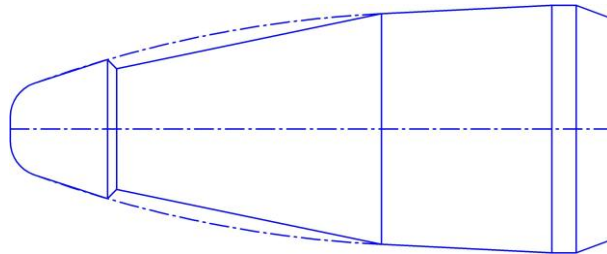


Рисунок 36 – Оправка новой формы

В отличие от классической сферической оправки на рабочей поверхности новой оправки наносится кольцевая выемка, образованная пересечением поверхностей обратного конуса и рабочего конуса оправки в носовой части и сопряжением поверхности кольцевой выемки с поверхностью рабочего конуса оправки в сечении, соответствующему началу калибрующего участка. В процессе деформации заготовки-гильзы накопленная внеконтактная поперечная деформация в виде избыточного объема металла в поперечном сечении заготовки-гильзы поглощается увеличенной щелью, образованной кольцевой выемкой оправки и валков, что способствует снижению давления металла на более загруженном участке оправки в очаге деформации.

Посредством размещенной на оправке кольцевой выемки (рисунок 36) также достигается:

- снижение лобового сопротивления оправки и улучшение условий вторичного захвата, способствующего улучшению качества гильз за счет снижения цикличности процесса прошивки;

- уменьшение накопления внеконтактной деформации и овальности поперечного сечения заготовки, способствующие снижению поперечной разностенности гильзы;

– перенос части избыточной деформации с участка с кольцевой выточкой на калибрующий участок, характеризующийся большим объемом и теплоемкостью, и, поэтому менее разогреваемым и, следовательно, более стойкий.

### 3.4 Выводы по третьей главе

1. Обработка и анализ данных по стойкости оправок был выполнен с использованием элементов математической статистики. Выборка данных по стойкости оправок описывается кривой показательного распределения (по критерию Пирсона гипотеза о показательном распределении стойкости оправок прошивного стана с вероятностью 90% подтверждается), что свидетельствует о высоком уровне рассеянности данных по стойкости оправок [127]. Таким образом, периоды выбраковки изношенных оправок характеризуются непредсказуемостью.

2. Проведен анализ по влиянию различных факторов на стойкость оправок, из которого следует, что на стойкость оправок явное влияние оказывает длина гильз (наибольшая стойкость наблюдается при прошивке гильз длиной 6 и 8 метров). Анализ по выявлению наиболее значимых факторов (размер оправок, режимы деформирования, машинное время прошивки, форма оправки) не представил возможным определить явного превалирующего действия каждого из них. Наиболее значимое влияние на стойкость оправок оказывают совместное сочетание вышперечисленных факторов.

3. Предложено техническое решение по увеличению стойкости оправок прошивного стана, основанное на изменении формы сферических оправок. Новая форма оправок способствует снижению усилия металла и уменьшению разогрева на ее более нагруженном участке.

#### 4 Испытания разработанных технических решений в промышленных условиях

##### 4.1 Проведение опытной прокатки на АО «ВТЗ».

На трубопрокатном агрегате ТПА 159 – 426 АО «ВТЗ» проведены опытно-промышленные прокатки по испытанию новой формы оправки, предложенной в пункте 3.3. На данном ТПА для получения гильз используется двухвалковый стан винтовой прокатки с бочковидными валками и направляющими неподвижными линейками.

До проведения опытной прокатки были разработаны оправки (рисунок 37), предназначенные для получения гильз диаметром 328-330 мм из заготовки диаметром 340 мм.

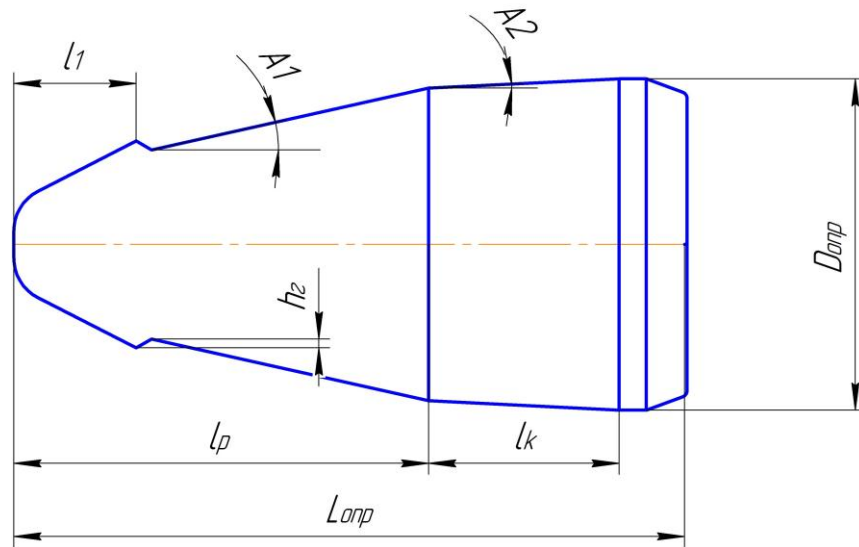


Рисунок 37 – Геометрические размеры оправок

В таблице 13 показаны геометрические размеры оправок

Диаметр оправки $D_{опр}$ , мм	Длина оправки $L_{опр}$ , мм	Длина рабочей поверхности $l_p$ , мм	Длина калибрующего участка $l_k$ , мм	Длина до начала гребня $l_1$ , мм	Высота гребня $h_2$ , мм	Угол рабочей поверхности, $A_1$ , град	Угол калибрующего участка $A_2$ , град
238	495	305	140	90	6,5	11	2,8
243	495	305	140	90	6,5	12	2,8

На рисунке 38 показан внешний вид экспериментальных оправок.



Рисунок 38 – Внешний вид экспериментальной оправки

На экспериментальной оправке диаметром 243 мм для получения трубы 245x8,94 мм (гильза 328-330 с толщиной стенки 8,9 мм) из стали Д и 244,48x11,99 (гильза 328-330 с толщиной стенки 30,5) из стали 25ХМ1ФБА было прошито 779 заготовок. На рисунке 39 показан очаг деформации процесса прошивки на оправке диаметром 243, полученный на основе расчета в программе Корх2.

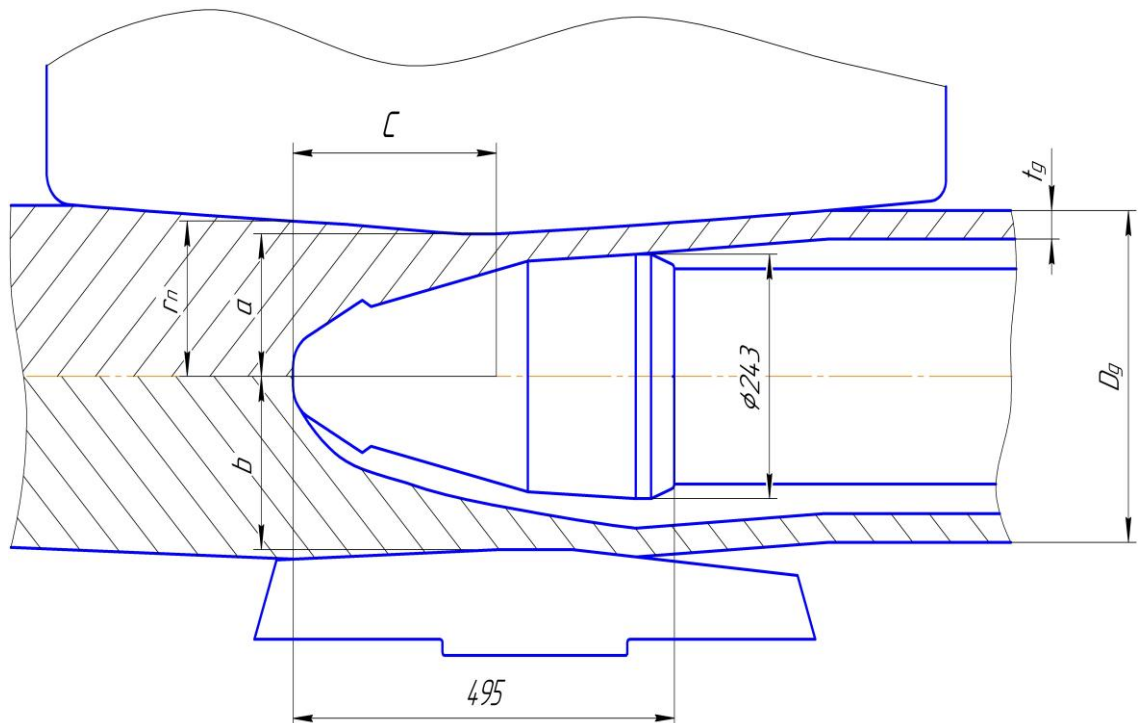


Рисунок 39 – Очаг деформации при винтовой прошивке на оправке диаметром 243 мм

В таблице 14 представлены настроечные параметры прошивного стана.  
Таблица 14 – Настроечные параметры прошивного стана при прошивке на экспериментальной оправке диаметром 243 мм

Диаметр заготовки, мм	Наружный диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм	Расстояние между валками в пережиме, а, мм	Обжатие в пережиме валков, %	Выдвижение оправки за пережим с, мм	Обжатие перед носком оправки, мм	Расстояние между линейками в пережиме валков, b мм
Из стали Д							
340	329	28,5	283	16,8	263,8	7,67	348
Из стали 25ХМ1ФБА							
340	330	30,5	284	16,5	199,9	9	332

На экспериментальной оправке диаметром 243 мм для получения трубы размером 245x8,94 мм было прошито 779 заготовок; стойкость действующих оправок составила 113-397 проходов (Рисунок 40).



Рисунок 40 - Стойкость экспериментальной и существующих оправок диаметром 243 мм



На рисунках 41 и 42 показаны изношенные экспериментальная и действующая оправки диаметром 243 мм.



Рисунок 41 – Изношенная экспериментальная оправка прошивного стана



Рисунок 42 – Изношенная действующая оправка прошивного стана

Как видно из рисунка 41 интенсивный износ экспериментальной оправки наблюдается на носовой части, а на рабочей поверхности износ незначительный, поверхность гладкая. На действующей оправке характерный интенсивный износ, наоборот, расположен на рабочей поверхности (Рисунок 42). При этом количество проходов существенно ниже, чем у экспериментальных оправок.

На прошивном стане ТПЦ-3 стойкость оправок значительно зависит от марки стали прошиваемого металла. При производстве труб размером 244,48×11,99 из стали 25ХМ1ФБА (наиболее проблемной марки стали в плане стойкости оправок) стойкость оправок резко снизилась: действующие оправки простояли 12-18 проходов; экспериментальные – 28 и 50 проходов (Рисунок 43).

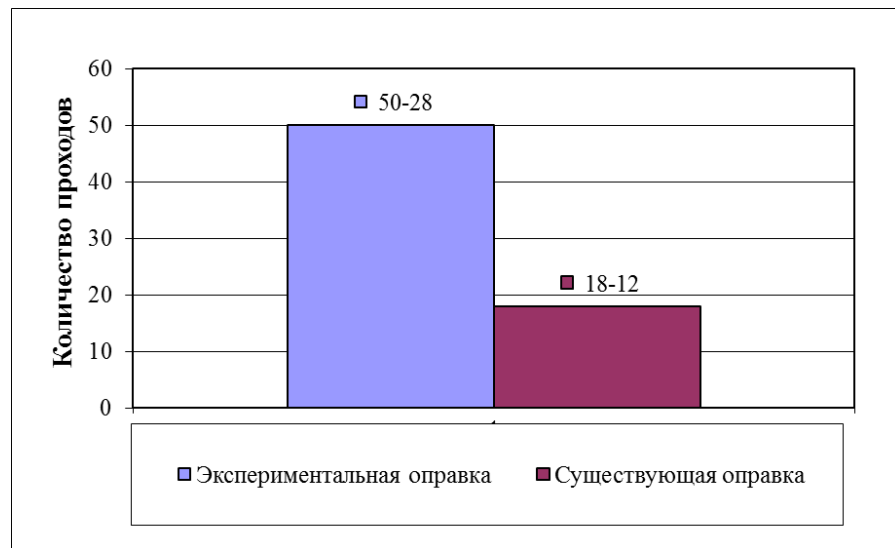


Рисунок 43 – Стойкость экспериментальных и существующих оправок диаметром 243 мм при прошивке заготовок из стали 25ХМ1ФБА

Таким образом, при получении труб размером 244,48×11,99 мм и 245×8,94 мм стойкость экспериментальных оправок оказалась существенно выше, чем действующих.

Так же были проведены опытные работы по получению труб (экспериментальная оправка диаметр 238 мм) размером 273×22 мм (гильза 342-344 с толщиной стенки 43 мм) из сталей 13ХФА и 20 КТ (Рисунок 44).

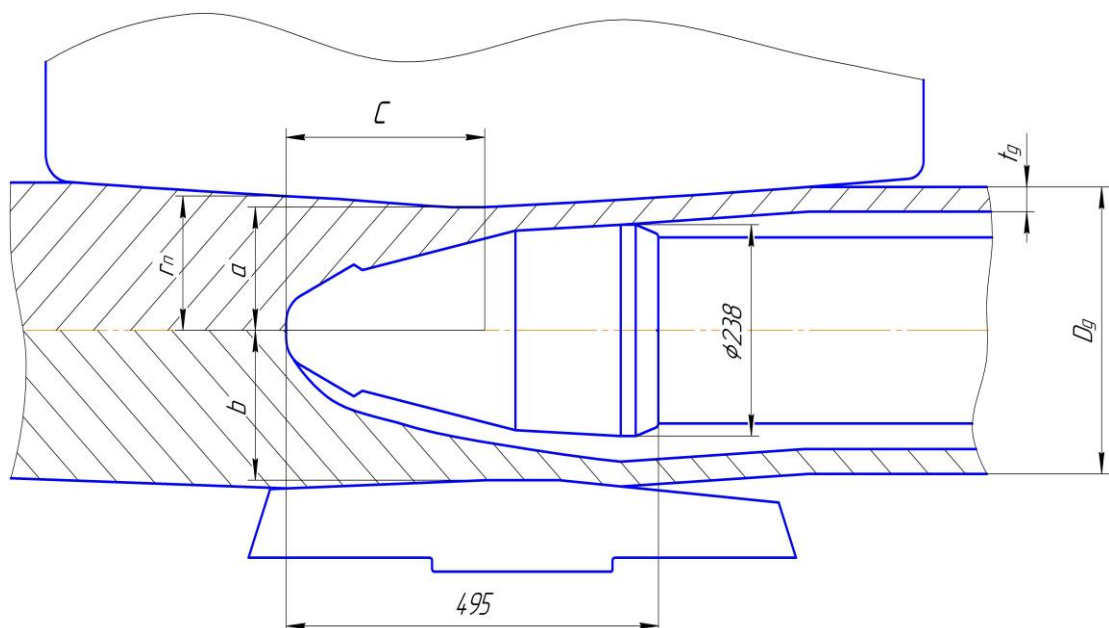


Рисунок 44 – Очаг деформации при винтовой прошивке на оправке диаметром 238 мм

В таблице 15 представлены настроечные параметры прошивного стана.

Таблица 15 – Настроечные параметры прошивного стана при прошивке заготовок на экспериментальной и штатной оправках для получения труб размерами 273x22 мм

Диаметр заготовки, мм	Наружный диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм	Расстояние между валками в пережиме а, мм	Обжатие в пережиме валков, %	Выдвижение оправки за пережим с, мм	Обжатие перед носком оправки, мм	Расстояние между линейками в пережиме валков, b мм
На штатной оправке диаметром							
340	343	43	298	12,3	208,4	5	348
На экспериментальной оправке							
340	345	43	299	12,1	183,4	5	350

При использовании экспериментальной оправки диаметром 238 мм было прошито 1295 заготовок в гильзы: 810 – из стали 13ХФА и 485 из стали 20КТ. На действующих оправках прошито 317 заготовок из стали 20 КТ (Рисунок 45 ).

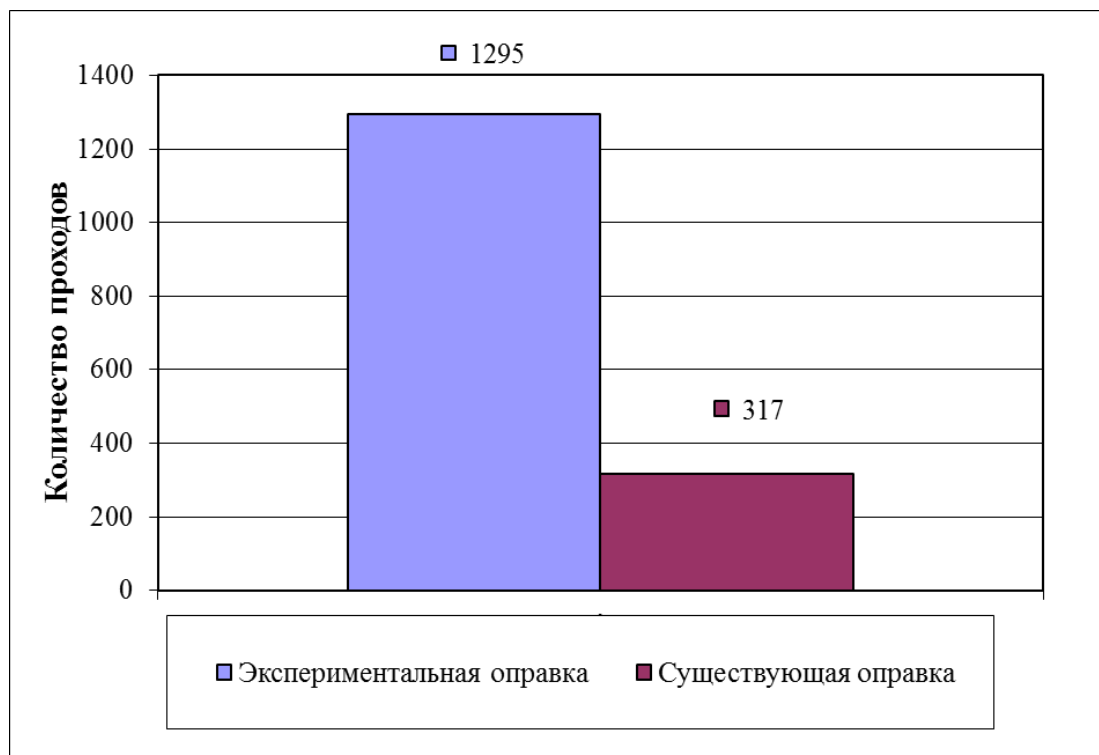


Рисунок 45 – Стойкость экспериментальной и существующих оправок диаметром 238 мм

#### 4.2 Проведение опытной прокатки на ПАО «СТЗ».

На Северском трубном заводе в 2014 году запускалась высокотехнологичная трубопрокатная линия по производству бесшовных труб на непрерывном стане «FQM» (Fine Quality Mill) фирмы «Danieli». Тонкостенные гильзы для непрерывного стана должны изготавливаться на двухвалковом стане винтовой прокатки (производства ОАО «ЭЗТМ») с грибовидными валками и направляющими линейками.

До настоящего времени прошивной стан использовался для получения толстостенных гильз, необходимых при производстве труб на пилигримовом стане.

Согласно контрактным требованиям фирмы «Danieli» необходимо получить гильзы со следующими геометрическими отклонениями

- отклонение наружного диаметра гильзы  $\pm 1\%$ ;
- отклонение толщины стенки  $\pm 5\%$ .

На рисунке 46 показана схема замеров геометрических параметров гильз в соответствии с требованиями фирмы «Danieli».

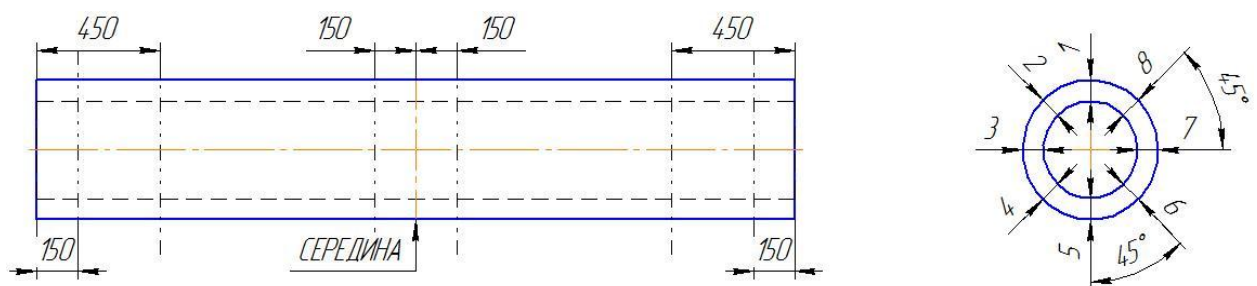


Рисунок 46 – Схема замеров геометрических параметров гильзы

На основе математических моделей, представленных в пункте 2.2, были разработаны калибровки линеек и оправок для получения тонкостенных гильз диаметром 328 мм из заготовки диаметром 290 мм.

#### 4.2.1 Разработка калибровки линеек

На рисунке 47 представлен эскиз направляющих линеек прошивного стана. Уклон рабочей поверхности на входной части линеек выполнен с углом  $5,2^\circ$ , поскольку при меньшем значении угла возможны проблемы со вторичным захватом заготовки по причине дополнительного сопротивления осевому движению заготовки со стороны линейки. На базе математических зависимостей, разработанных в пункте 2.2.1, было определено, что при меньшем значении угла расстояние между осью прокатки и поверхностью линейки равно или меньше расстояния между осью прокатки и поверхностью валков.

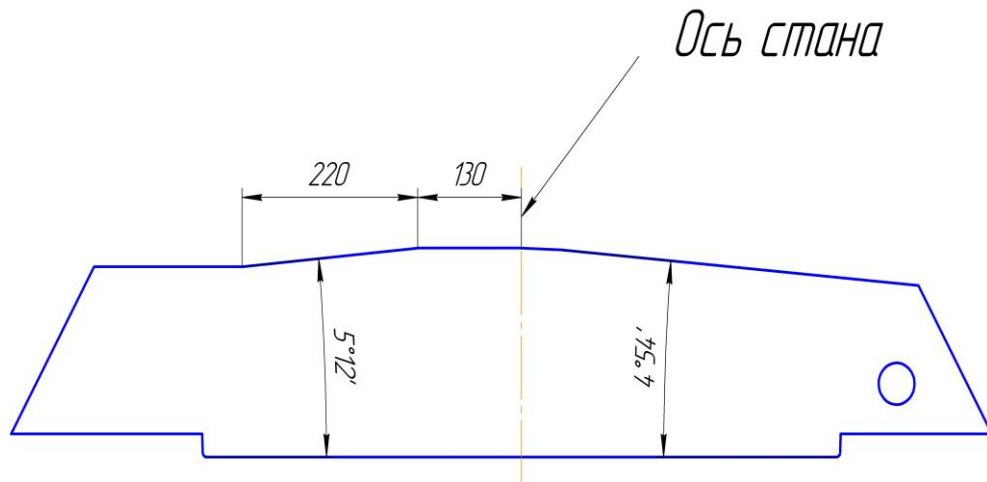


Рисунок 47 – Эскиз направляющих линеек прошивного стана

В начале входной стороны линейки расположена цилиндрическая площадка, что увеличивает функцию линейки как направляющего инструмента в безоправочной зоне очага деформации.

Для уменьшения овальности заготовки в районе пережима расположен гребень протяженностью 130 мм.

Угол на выходной стороне линейки определен из условия обеспечения коэффициента овализации в пределах от 1,12 до 1,15.

Для обеспечения получения гильз с высокой точностью по наружному диаметру снижено развитие внеконтактной деформации за счет работы

большей части желоба линейки. Это достигается при радиусе желоба рабочей поверхности линейки, равном  $R=163$  мм и рассчитанном по математической модели (пункт 2.2.3).

При проектировании ширины и высоты направляющих линеек задавались следующие проектные параметры: расстояние между линейками  $b_p = 290$  мм, расстояние между валками в пережиме  $a_p = 256$  мм, валки развернуты на угол подачи  $10^\circ$ . На рисунке 48 представлен поперечный разрез очага деформации при прошивке и показаны проектные параметры.

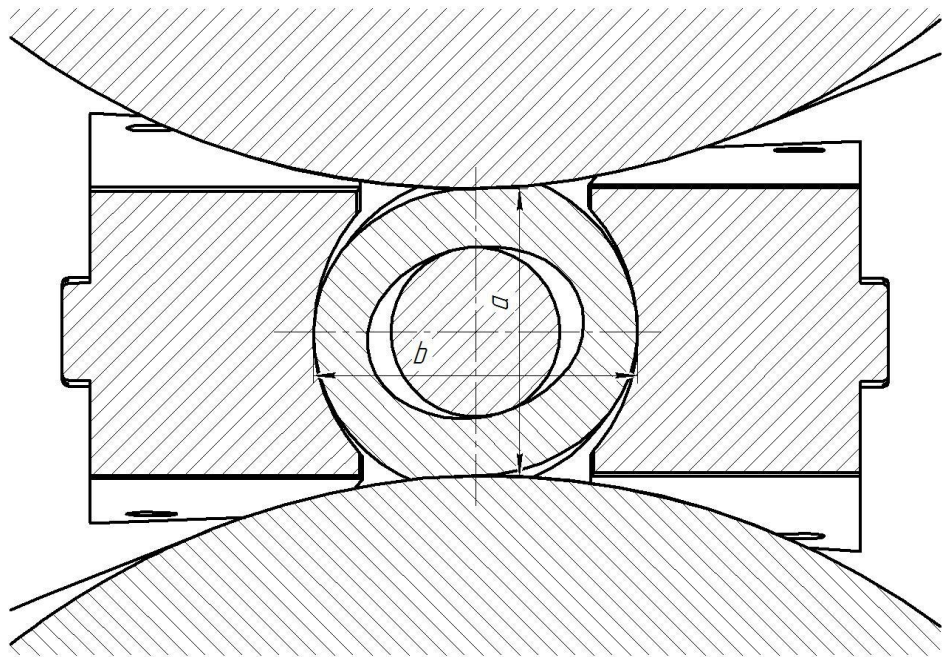


Рисунок 48 - Поперечный разрез очага деформации при прошивке

Процесс прошивки тонкостенных гильз характеризуется повышенной деформацией заготовки-гильзы в очаге деформации, которая при не закрытости калибра прошивного стана приводит к зажиму заднего конца гильзы (Рисунок 49), а в некоторых случаях и к образованию ленты (Рисунок 50).





Рисунок 49 – Зажим заднего конца гильзы



Рисунок 50 – Образование ленты при получении тонкостенных гильз

Для исключения образования зажима заднего конца гильзы в период освобождения из очага деформации, а также образования ленты на базе твердотельного моделирования спроектирована калибровка линейки, обеспечивающая на всем протяжении очага деформации в поперечном сечении максимально возможную закрытость калибра. При этом зазор в выходной стороне очага деформации составлял от 9 до 10 мм, а во входном конусе – 12 мм (Рисунок 51,52).

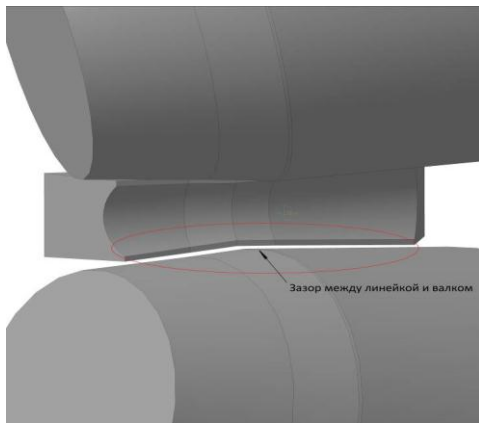


Рисунок 51 – Фрагмент трехмерной модели



Рисунок 52 – Фрагмент очага деформации

Чертеж разработанной линейки прошивного стана представлен в приложении.

## 4.2.2 Разработка калибровки оправок

Для определения диаметра оправок найдена величина «разбоя», определяемая в математической модели пункта 2.2.4.

В результате расчета величина «разбоя» для гильзы с наружным диаметром 328 мм составила 14 мм. В таблице 16 представлены диаметры оправок прошивного стана для получения гильз, необходимых в производстве труб на непрерывном стане.

Таблица 16 – Диаметры оправок прошивного стана для получения гильз диаметром 328 мм

Типоразмер гильзы $D_r \times t_r$ , мм	Величина «разбоя», мм	Диаметр оправки $d_{опр}$ , мм	Расстояние между валками в пережиме а, мм	Расстояние между линейками в пережиме валков b, мм
328×20,55	14	273	328	370
328×23,7		267		
328×28,3		257		
328×34,2		246		
328×40,35		233		
328×46,5		221		

Длину оправок определяли на основе соответствия очагу деформации (Рисунок 53), полученного при разработке калибровки линеек прошивного стана с учетом настройки по определению величины «разбоя». Выдвижение оправки рассчитывали из условий:

– заготовка до встречи с торцом оправки должна сделать один полный оборот.

– с целью уменьшения вероятности образования внутренних плен величина обжатия перед носком оправки должна находиться в пределах 5-6%.



Поскольку величина «разбоя» и настроечные параметры для всех типоразмеров гильз по стенке идентичны, то длина оправок для гильз с наружным диаметром 328 составила 535 мм. (Рисунок 53).

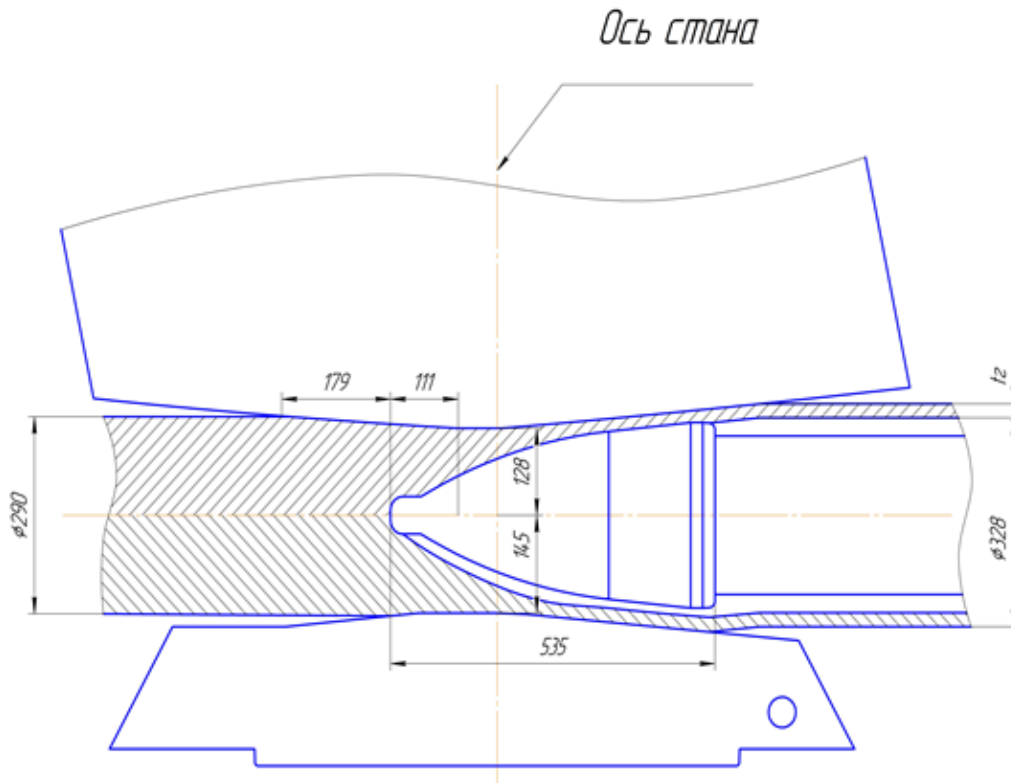


Рисунок 53 – Очаг деформации при проектировании оправок прошивного стана

В таблице 17 представлены настроечные параметры для получения гильз, необходимых для производства труб в непрерывном стане.

Таблица 17 – Настроечные параметры для получения гильз

Диаметр заготовки, мм	Наружный диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм	Диаметр оправки, мм	Длина оправки, мм	Расстояние между валками в пережиме, мм	Расстояние между линейками, мм	Выдвижение оправки за пережим, мм	Угол подачи, град	Угол раскатки, град
290	328	20,5	273	535	256	288	111	10	12
290	328	23,7	267	535	256	288	111	10	12
290	328	28,3	257	535	256	288	111	10	12
290	328	34,2	246	535	256	288	111	10	12
290	328	40,3	233	535	256	288	111	10	12
290	328	46,5	221	535	256	288	111	10	12

В приложении представлен чертеж разработанных оправок.

### 4.2.3 Проведение опытной прокатки

На ПАО «СТЗ» было проведено гарантийное испытание технологических режимов прошивки и прокатного инструмента прошивного стана (оправок и линеек). Из практики трубного производства известно, что возможные трудности при освоении технологии возникают при получении тонкостенных гильз. Поэтому гарантийные испытания проводились для получения тонкостенной гильзы с наружным диаметром 328 мм и толщиной стенки 23,7 мм из заготовки диаметром 290 мм.

Для проведения опытной прокатки было изготовлено по два комплекта линеек и оправок прошивного стана. С целью проверки степени закрытости очага деформации в планово – предупредительный ремонт была проведена «холостая» установка прокатного инструмента в прошивной стан (Рисунок 52). Установка изготовленных линеек в прошивной стан показала достаточную симметричную закрытость очага деформации.

Экспериментальный прокат проводился в потоке производства труб  $\varnothing 245 \times 8,9$  мм на пилигримовых станах с использованием НЛЗ  $\varnothing 290$  мм (сталь марки Д) длиной 2600 мм. Подготовленные четыре заготовки  $\varnothing 290$  мм были нагреты в реконструированной фирмой «Danieli» кольцевой печи № 2 в соответствии с требованиями ВТИ 162-Тр.Тб-58 и режимной карты к ней.

Прокатный инструмент прошивного стана был установлен согласно разработанным режимам прошивки (Таблица 18).

Таблица 18 – Параметры настройки прошивного стана при прокатке гильзы  $\varnothing 328 \times 23,7$  мм

Расстояние между:		Угол		Выдвижение оправки за пережим валков, мм	Частота вращения валков, об/мин.
Валками, мм	Линейками, мм	Поддачи, град	Раскатки, град		
256	290	10	12	111	30/60

При проведении опытной прокатки проблем с первичным и вторичным захватом не возникали.

На рисунке 54 показана полученная гильза диаметром 327 мм и толщиной стенки 23,7 мм.



Рисунок 54 – Гильза диаметром 328 мм и толщиной стенки 23,7 мм

Третья полученная гильза была порезана на патрубки для замера геометрических параметров в соответствии с требованиями фирмы-изготовителя непрерывного стана Danieli (Рисунок 46). Вырезанные кольца из этих патрубков приведены на рисунке 55.



а)

б)

в)

г)

д)

Рисунок 55 – Вырезанные кольца: а) с переднего конца на расстоянии 150 мм; б) с переднего конца на расстоянии 450 мм; в) с середины гильзы; г) с заднего конца на расстоянии 150 мм; д) с заднего конца на расстоянии 450 мм.

Результаты замеров геометрических параметров гильзы приведены в таблицах 19 и 20

Таблица 19 – Замеры наружного диаметра гильзы  $\varnothing 328 \times 23,7$  мм

Замеры наружного диаметра на отрезанных патрубках									
Передний конец				Середина		Задний конец			
На расстоянии 150 мм		На расстоянии 450 мм				На расстоянии 450 мм		На расстоянии 150 мм	
Диаметр, мм	Отклон, %	Диаметр, мм	Отклон, %	Диаметр, мм	Отклон, %	Диаметр, мм	Отклон, %	Диаметр, мм	Отклон, %
Допустимое отклонение стенки $\pm 1\%$									
328,05	0,32	328,05	0,32	326,03	-0,30	325,01	-0,61	329,06	0,63
327,04	0,01	326,03	-0,30	328,05	0,32	326,03	-0,30	323,99	-0,92

Таблица 20 – Замеры толщины стенки полученной гильзы  $\varnothing 328 \times 23,7$  мм и отклонение от номинального значения.

Замеры толщины стенки на отрезанных патрубках										
градусы	Передний конец				Середина		Задний конец			
	На расстоянии 150 мм		На расстоянии 450 мм				На расстоянии 450 мм		На расстоянии 150 мм	
	Стенка, мм	Отклон, %	Стенка, мм	Отклон, %	Стенка, мм	Отклон, %	Стенка, мм	Отклон, %	Стенка, мм	Отклон, %
Допустимое отклонение стенки $\pm 5\%$										
0	23,12	-2,45	23,95	1,05	22,86	-3,54	24,42	3,04	23,39	-1,31
45	24,31	2,57	24,24	2,28	23,35	-1,48	24,33	2,66	22,86	-3,54
90	24,1	1,69	24,55	3,59	23,51	-0,80	23,74	0,17	23,12	-2,45
135	23,5	-0,84	23,16	-2,28	24,06	1,52	23,65	-0,21	23,53	-0,72
180	23,48	-0,93	23,04	-2,78	23,44	-1,10	24,1	1,69	23,39	-1,31
225	24,31	2,57	23,76	0,25	24,18	2,03	23,38	-1,35	22,72	-4,14
270	23,5	-0,84	24,32	2,62	24,53	3,50	22,91	-3,33	22,58	-4,73
315	22,79	-3,84	23,77	0,30	23,79	0,38	23,35	-1,48	22,68	-4,30

Из данных таблицы 19 видно, что все замеры отклонения наружного диаметра от номинального значения укладываются в допуск  $\pm 1\%$ , установленный фирмой-изготовителем непрерывного стана Danieli.

Все замеры толщины стенки гильзы (таблица 20) имеют отклонение от номинального её значения меньше допустимого «Danieli» показателя  $\pm 5\%$ .

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что разработанный технологический инструмент прошивного стана и его настройка позволили получить гильзы с требуемыми «Danieli» геометрическими параметрами.

#### 4.3 Выводы по четвертой главе

1. В результате проведенных исследований на прошивном стане ТПА 159-426 АО «ВТЗ» экспериментальные оправки, предложенные в пункте 3.3, показали свою работоспособность и повышенную стойкость в сравнении с существующими оправками.
2. Основной износ на экспериментальных оправках наблюдался в области носка при сохранении удовлетворительного состояния рабочей поверхности, в то время как на штатных оправках основной износ наблюдался на рабочей поверхности.
3. На основе новых математических моделей (пункт 2.2) на ПАО «СТЗ» разработана технология получения тонкостенных гильз на прошивном стане с грибовидными валками и направляющими линейками. Новая технология включает разработку калибровок прокатного инструмента прошивного стана, режимов деформации.
4. Разработанный технологический инструмент прошивного стана и его настройки позволили получить гильзы с геометрическими параметрами, требуемыми фирмой «Danieli».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной диссертационной работы достигнута цель и получены следующие результаты:

1. Численно исследовано напряженно-деформированное состояние заготовки при двухвалковой винтовой прошивке, которое позволило объяснить характер изменения напряженно-деформированного состояния металла за один оборот заготовки, и численно определено влияние коэффициента овализации и угла подачи на уровень осевых растягивающих напряжений в центральной зоне заготовки.

2. Разработана методика определения настроечных параметров при двухвалковой винтовой прошивке, учитывающая искажение очага деформации углами подачи и раскатки.

3. Разработана математическая модель по проектированию направляющих линеек. Согласно новой профилировке линейки, разработанной на основе данной математической модели, уменьшается развитие внеконтактной (поперечной) деформации, что способствует уменьшению овальности заготовки – гильзы в очаге деформации прошивного стана, а, следовательно, приводит к повышению точности гильз.

4. Разработана математическая модель проектирования оправок, необходимых для получения тонкостенных гильз. По новой методике определяется величина зазора между диаметром оправки и внутренним диаметром гильзы («разбой»). Выявлено, что величина «разбоя» гильзы зависит от настроечных параметров процесса прошивки, диаметра прошиваемой заготовки и от калибровки прокатного инструмента.

5. На основе новых математических моделей разработана технология получения гильз, необходимых для производства труб на непрерывном стане «FQM» (Fine Quality Mill) Северского трубного завода. Данная технология прошла апробацию в период гарантийных испытаний и позволила получить гильзу

повышенной точности: отклонение наружного диаметра гильзы  $\pm 1\%$ ; отклонение толщины стенки  $\pm 5\%$ .

6. Решена оптимизационная задача двухвалковой винтовой прошивки с направляющими линейками. Критерием оптимизации является минимизация машинного времени прошивки. Управляющими параметрами служат относительное обжатие заготовки в пережиме валков и угол подачи. При решении оптимизационной задачи была разработана система ограничений винтовой прошивки, которая обеспечивает получение качественных гильз и труб.

7. Решена оптимизационная задача процесса «передняя зацентровка» заготовки. Критерием оптимизации является усилие зацентровки. Управляющими параметрами являются угол конусности бойка и длина рабочей поверхности бойка. При решении оптимизационной задачи была разработана система ограничений операции «передняя зацентровка», которая обеспечивает при последующей прошивке получение гильз с повышенным качеством.

8. Проведен анализ по влиянию различных факторов на стойкость оправок, из которого следует, что на стойкость оправок явное влияние оказывает длина гильз (наибольшая стойкость наблюдается при прошивке гильз длиной 6 - 8 метров).

9. Предложено техническое решение по увеличению стойкости оправок прошивного стана, основанное на изменении формы сферических оправок. Новая форма оправок способствует снижению усилия металла и уменьшению разогрева на ее более нагруженном участке. Апробация данного технического решения проведена на прошивном стане ТПА 159-426 АО «ВТЗ». В результате проведенных исследований экспериментальные оправки показали свою работоспособность и повышенную стойкость в сравнении с существующими оправками.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Лифанов, В.Я. Трубная промышленность России. Вектор инноваций. К итогам XXI Международной научно-практической конференции «Трубы – 2014» / В.Я. Лифанов // Производство проката – 2015 г. - №1. – С. 22 – 27.
- 2 Выдрин, А.В. Развитие технологий горячей прокатки бесшовных труб / А.В. Выдрин // Черные металлы – 2012 г. - №9. – С. 16 – 20.
- 3 Осадчий, В.Я. Производство и качество стальных труб: учебное пособие для вузов / В.Я. Осадчий, А.П. Коликов; под ред. В.Я. Осадчего. – М.: Издательство МГУПИ, 2012 г.. – 370 с.
- 4 Гуляев, Ю.Г. Актуальные проблемы и тенденции развития трубного производства / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.А. Коряка // Черные металлы – 2010 г. – №3. – С. 8 – 14.
- 5 Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007г. – 560 с.
- 6 Технология трубного производства: учебник для вузов / В. Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев – М.: Интермет Инжиниринг, 2002г. – 640 с.
- 7 Шевакин, Ю.Ф. Производство труб: учебное пособие / Ю.Ф. Шевакин, А.П. Коликов, Ю.Н. Райков; под ред. Ю.Ф. Шевакина. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005г. – 568 с.
- 8 Чикалов, С.Г. Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки / С.Г. Чикалов. – Волгоград: Комитет по печати и информации, 1999г. – 416 с.
- 9 Чикалов, С.Г. Освоение производства бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки на ТПА 159 – 426 / С.Г. Чикалов, М.М. Фадеев, А.К. Беломестнов и др. // Сталь. – 1999г. – №1. – С. 46 – 49.
- 10 Смирнов, А.Н. Непрерывная разливка стали: учебник для вузов / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011г. – 482 с.



11 Шепель, Г.Г. Повышение качества трубной заготовки для горячедеформированных бесшовных труб / Г.Г. Шепель, П.П. Навныко, О.А. Симоненко и др. // Сталь – 2002г. - №8- С. 84-85.

12 Минаев, А.А. Специфика использования катаной и непрерывнолитой заготовки для производства труб / А.А. Минаев, М.В. Захур, Ю.В. Коновалов // Производство проката – 2005г. – №4. – С. 29-37.

13 Лубе, И.И. Применение непрерывнолитой заготовки круглого сечения для сортопрокатного производства / И.И. Лубе, С.А. Ботников, В.П. Турбар // Сталь. – 2014г. – №12 – С. 41-42.

14 Клачков, А.А. Опыт эксплуатации первого в России непрерывного стана с трехвалковыми клетями PQF 10 3/4"в ОАО «Тагмет» / А.А. Клачков // Труды международной научно - технической конференции «Трубы – 2011». – Челябинск: Изд-во ООО «Полиграф-Мастер»– 2011 – №2 – С. 17 – 20.

15 Топоров В.А. Комплексная реконструкция сталеплавильного и трубопрокатного производства на ОАО «СТЗ» - новый шаг к производству высококачественных труб для нефтегазовых компаний / В.А. Топоров // Труды международной научно - технической конференции «Трубы – 2014». – Челябинск: Изд-во ООО «Полиграф-Мастер» – 2015г. – №2 – С. 17 – 20.

16 Столетний, М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт. – М.: Металлургия, 1975.- 240 с.

17 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.

18 Dr. PeterHeimerzheimПрошивные косовалковые станы. Качество с самого начала / Dr. PeterHeimerzheim, OlafSzebsdat // SMSMEER, CorporateCommunications, Германия. – 2012г. – №3. – С. 8-9.

19 Толмачев, В.С. Освоение прошивки гильз на стане конструкции ЭЗТМ / В.С. Толмачев, А. И. Степанов, Ю. Г. Губин // Сталь – 2009 г. – №7 – С. 56 – 57.

20 Толмачев, В.С. Совершенствование процесса производства горячекатаных труб в условиях ОАО «Северский трубный завод» / В. С.

Толмачев, А.И Степанов, Р.О. Бушин // Труды международной научно - технической конференции «Трубы – 2011». – Челябинск: Изд-во ООО «Полиграф-Мастер»– 2011г. – №2 – С. 225 – 228.

21 Марченко, К.Л. Прошивка непрерывнолитой заготовки при повышенном обжатии / К.Л. Марченко, К.А. Поляков, Б.А. Романцев // Прокатное производство – 2005 г. – №2 – С 14 – 17.

22 Марченко, К.Л. Эффективные режимы прошивки непрерывнолитой заготовки на стане винтовой прокатки ТПА 200 ВТЗ // К.Л. Марченко, К.А. Поляков, Б.А. Романцев, А.В. Гончарук и др. // Труды пятого конгресса прокатчиков. – Череповец – 2004 г. – С 303 – 305.

23 Марченко, К.Л. Интенсификация процесса винтовой прошивки непрерывнолитых заготовок с целью повышения качества труб: автореферат дис. ...канд. техн. наук / К. Л. Марченко – Москва – 2007 г. – 24 с.

24 Лубе, И.И. Исследование процесса прошивки заготовок в двухвалковом стане винтовой прокатки в гильзы с «подъемом» по диаметру / И.И. Лубе, А.С. Алещенко // Прогрессивные технологии пластической деформации: сб. науч. тр. – М.: МИСИС – 2008 г.– С 479 – 483.

25 Алещенко А.С. Исследование процесса прошивки на двухвалковом стане винтовой прокатки. / А.С. Алещенко, И.И. Лубе, Д.В. Богатырев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008 г. – №7 – С.20 – 23.

26 Лубе, И.И. Исследование и совершенствование технологии горячей прокатки труб из непрерывнолитой заготовки на агрегатах с непрерывным станом: автореферат дис. ...канд.техн. наук / И.И. Лубе – Москва – 2010 г. – 21 с.

27 Пат. 2440202 Российская Федерация, МПК В21В 21/100. Способ прокатки гильзы на прошивном стане / Толмачев В.С., Старостин Ю.А., Топоров В.А., Пятков В.Л, Губин Ю.Г. – № 2010118832/02; заявл. 11.05.2010; опубл. 20.01.2012, Бюл. №2 – 6 с.

28 Пат. 2419497 Российская Федерация, МПК В21В 19/04. Способ прокатки гильзы на прошивном стане / Толмачев В.С., Зувев М.В., Топоров В.А.,

Мухин В.А., Старостин Ю.А. – № 2010109729/02; заявл. 15.03.2010; опубл. 27.05.2011, Бюл. №5 – 5 с.

29 Галкин, С.П. К вопросу о выборе типа прошивного стана / С.П. Галкин, А.В. Гончарук, Б.А. Романцев // Сталь – 2012 г. – №1 – С. 42 – 45.

30 Голубчик, Р.М. Оптимизация отношения диаметра заготовки к диаметру гильзы при прошивке заготовок в станах различного конструктивного исполнения / Р. М. Голубчик, Д.В. Меркулов, Е.К. Медведев // Труды международной научно - технической конференции «Трубы – 2009». – Челябинск: Изд-во ООО «Полиграф-Мастер»– 2009 – №2 – С. 74 – 78.

31 Зибель, Э. Обработка металлов в пластическом состоянии / Э. Зибель. – М.: Metallurgizdat, 1934. – 197 с.

32 Емельяненко, П.Т. Теория косой и пиллигримовой прокатки / П.Т. Емельяненко. – М.: Metallurgiya, 1949. – 491 с.

33 Тетерин, П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки: учебник для вузов / П.К. Тетерин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgiya, 1971. – 368 с.

34 Шевченко, А.А. Ступенчатая калибровка валков прошивного стана пилигримовых установок / А.А. Шевченко, Г.А. Пищиков // Производство труб: сб. науч. тр. – УкрНИТИ: Metallurgizdat – 1959 – вып. 6 – С. 33 – 37.

35 Швейкин, В.В. Улучшение технологии прокатки труб из слитков / В. В. Швейкин, Л. Н. Кириенко // Сталь – 1957 г. – №4 – С. 340 – 343.

36 Матвеев, Ю.М. Калибровка инструментов трубных станов / Ю. М. Матвеев, Я.Л. Ваткин – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgiya, 1970. – 480 с.

37 Романцев, Б.А. Обработка металлов давлением: учебник / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин – М.: Дом МИСИС, 2008. – 960 с.

38 Выдрин, А.В. Развитие теории процессов производства и отделки труб / А.В. Выдрин, Баричко Б.В., Космацкий Я.И. // Пластическая деформация металлов. – Днепропетровск: Изд-во Акцент – 2014 г. – №1 – С.83-88.

39 Hayashi S., Ymakawa T/ISIJ International. 1997v.37, №2,p.1463.

40 Morioka N., Oka H, Simizu T/ II Kawasaki Steel technical report. 1998. №38. P. 38 – 46.

41 Матвеев, Б.Н. Новые исследования процесса прошивки заготовок в косовалковых станах / Б.Н. Матвеев, Р.М. Голубчик // Сталь – 2000 г. - №9 – С. 53 – 58.

42 Голубчик, Р. М. Повышение эффективности процесса прошивки заготовок с учетом исходной пластичности / Р.М. Голубчик, Е.Д. Клемперт, Д.В. Меркулов, С.В. Титова, М.В. Чепурин // Сталь – 2001 г. – №1 – С. 55 – 59.

43 Голубчик, Р. М. Новая методика расчета параметров настройки прошивных косовалковых косовалковых станов / Р. М. Голубчик, Е. Д. Клемперт, Д. В. Меркулов, С.В. Титова, С. Е. Русанов // Производство проката – 2001 г. – №8 – С. 20 – 23.

44 Голубчик, Р. М. Совершенствование прошивки заготовок из сталей с разной исходной пластичностью / Р. М. Голубчик, Е. Д. Клемперт, Д. В. Меркулов, С.В. Титова, С. Е. Русанов // Черная металлургия – 2001 г. - №9 – С. 39 – 42.

45 Голубчик, Р.М. Анализ и совершенствование режимов прошивки заготовок на агрегате 159-426 ВТЗ / Р. М. Голубчик, Д.В. Меркулов, М.В. Чепурин, С.В. Титова, А.А. Клачков // Труды международной научно - технической конференции «Трубы – 2011». – Челябинск: Изд-во ООО «Полиграф-Мастер»– 2011г. – №2 – С. 74 – 78.

46 Меркулов, Д.В. Анализ и совершенствование режимов прошивки непрерывнолитых заготовок в условиях северского трубного завода / Д.В. Меркулов, М.В. Чепурин, В.А. Топоров, В.С. Толмачев // Труды XXЮбилейной научно - технической конференции «Трубы – 2012». – Челябинск: Изд-во ООО «Полиграф-Мастер»– 2012г – №2 – С. 161 – 166.

47 Меркулов, Д.В. Диаметр прошиваемой заготовки и качество гильз и труб / Д.В. Меркулов, М.В. Чепурин, В.А. Топоров, В.С. Толмачев, А. И. Степанов // Труды XXЮбилейной научно - технической конференции «Трубы – 2012». – Челябинск: Изд-во ООО «Полиграф-Мастер»– 2012г – №2 – С. 167 – 171.

48 Dr. Krahn. Прошивка на косовалковом стане – основы и технология // Dr. Krahn // SMSMEER, Германия. – 2007. – 48 с.

- 49 Полухин, П.И. Новая технология винтовой прокатки/ П.И. Полухин, И.Н. Потапов. – М.: Metallurgy, 1975. – 342 с.
- 50 Чекмарев, А.П. Прошивка в косовалковых станах/ А.П.Чекмарев, Я.Д. Ваткин, М.И. Ханин и др. – М.: Metallurgy, 1967. – 240 с.
- 51 Ходак, И.З. Разработка установки, исследование и внедрение процесса прошивки с осевым подпором заготовки: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук/ И.З. Ходак. – Челябинск, 1969.
- 52 Нодев, Э.О. Прошивка заготовок а двухвалковом стане с принудительным вращением оправки / Э.О. Нодев, Н.М. Ведякин, В.И. Белоконь. – Бюллетень ЦНИИЧМ, 1973. – №20(712). – С. 48-51.
- 53 Бердянский, М.Г. Прошивка заготовок на невращающейся оправке/ М.Г. Бердянский, И.З. Ходак, В.Ф. Верник и др.// Бюллетень ЦНИИЧМ, 1974. – №24(740). – С. 24-26.
- 54 Ваткин, Я.Л. Новые калибровки валков прошивных станов / Я.Л. Ваткин, А.А. Шевченко, И.М. Суконник. – Бюллетень ЦНИИЧМ, 1966. – 24(548). – С. 25-27.
- 55 Ваткин, Я.Л. Калибровка валков станов поперечно-винтовой прокатки/ Я.Л. Ваткин, И.М. Суконник // Производство сварных и бесшовных труб. – Metallurgy, 1968. – № 9. – С. 87-93.
- 56 Ваткин, Я.Л. Исследования основных параметров прошивки в косовалковых станах на валках новых калибровок / Я.Л. Ваткин // Обработка металлов давлением, 1970. – №54. – 194 с.
- 57 Фомичев, И.А. Косая прокатка / И.А. Фомичев – Харьков: Metallurgy, 1963. – 262 с.
- 58 Смирнов, В.С. Теория прокатки / В.С. Смирнов – М: Metallurgy, 1967. – 460 с.
- 59 Смирнов, В.С. Теория обработки металлов давлением / В. С. Смирнов – Л: ЛПИ, 1965 – 286 с.

- 60 Смирнов, В.С. Механизм разрушения при поперечной прокатке / В.С. Смирнов, И.А. Ефимов // Известия вузов: Черная металлургия – 1970 г. - №4 – С. 37-45.
- 61 Лисочкин, А.Ф. Поперечная прокатка / А.Ф. Лисочкин // Сталь 1946 г. - №6 – С. 378 – 385.
- 62 Швейкин, В.В. Об образовании полости при кривой прокатке / В.В. Швейкин // Теория прокатки – М.: Металлургия – 1982г. – С. 681 – 687.
- 63 Пляцковский, О.А. Деформация и механизм разрушения сердцевинной заготовки при прокатке на станах винтовой и поперечной прокатки / О.А. Пляцковский, О.Г. Хохлов // Известия вузов: Черная металлургия – 1962 г. – №2 – С. 88-91.
- 64 Целиков, А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков – М.: Металлургия, 1962. – 494 с.
- 65 Воронцов, В.К. Фотопластичность / В.К. Воронцов, П.И. Полухин – М: Металлургия, 1969 – 198 с.
- 66 Голубчик, Р.М. Исследование процессов производства труб (поляризационно-оптический метод) / Р.М. Голубчик, П.И. Полухин, М.Ю. Матвеев – М: Металлургия, 1970 – 326 с.
- 67 Колмогоров, В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров – М: Металлургия, 1970 – 230 с.
- 68 Колмогоров, В.Л. К разрушению при поперечной прокатке и ковке / В.Л. Колмогоров // Известия вузов: Черная металлургия – 1963 – №11 – С. 123 – 126.
- 69 Богуславский Г.В. Деформация круглых тел при радиальном обжатии между плоскими плитами / Г.В. Богуславский // Вопросы теории и практики обработки металлов давлением. – 1959г. – С.26-29.
- 70 Бровман М.Я. Деформация металла при поперечной прокатке / М.Я. Бровман // Сталь – 1959г. – №1 – С.26-29.
- 71 Лунев В.А. Распространение пластической деформации при поперечной прокатке / В.А. Лунев // Труды ЛПИ – 1964г – №238 – С.47-55.

- 72 Остренко, В.Я Деформация трубной заготовки при поперечной осадке / В.Я. Остренко, Ю.И. Миронов, И.К. Гейко // Производство труб – 1965г – №16 – С.17-25.
- 73 Потапов, И.Н. Исследование деформированного состояния при винтовой прокатке с помощью координатных сеток. / И.Н. Потапов, П.И. Полухин, Б.А. Романцев // Известия вузов Черная металлургия –1974г – №11 – С. 65-68.
- 74 Орлов, С.И. Деформация цилиндрических тел при многократной поперечной осадке / С.И. Орлов, В.В. Швейкин // Известия вузов Черная металлургия – 1960г – № 1 – С.108-115.
- 75 Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением/ М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
- 76 Поперечно-клиновья прокатка/ Г.В. Андреев, В.А.Клушин, Е.М. Макушок и др.// Наука и техника – Минск. – 149 с.
- 77 Курятников, А.В. Интенсификация производства и повышения качества труб путем обжатия и профилирования трубной заготовки/ А.В. Курятников. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Челябинск, 1987.
- 78 Никулин, А.Н. Напряженно – деформированное состояние при винтовой прокатке и совершенствование технологии производства труб и сорта / А.Н. Никулин. – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва, 2000г.
- 79 Интенсификация поперечно-винтовой прокатки / А.П. Чекмарев, Ю.М. Матвеев, В.Н. Выдрин, Я.С. Финкельштейн. – М.: Металлургия, 1970.– 184 с.
- 80 Потапов, И.Н. Технология винтовой прокатки / И.Н. Потапов, П.И. Полухин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
- 81 Ваткин, Я.Л. Влияние несимметричности нагрева заготовок на разностенность горячекатаных подшипниковых труб / Я.Л. Ваткин, М.К. Клейнер, Г.А. Эммануэль // Сталь – 1972г. – №6 – С. 537-541

82 Осипов, Э.А. Регулирование продольной разнотолщинности бесшовных труб / Э.А. Осипов, Г.А. Осипов, В.И. Пермяков // Механизация и автоматизация производства – 1974г – №1 – С.22-23.

83 Ханин, М.И. Технология прокатки тонкостенных труб повышенной точности на агрегате с автоматическим станом с использованием нестационарных режимов деформации при прошивке / М.И. Ханин // Metallургическая и горнорудная промышленность – 2002г. – №8 – С. 361-363.

84 Ханин, М.И. Режимы прошивки, обеспечивающие снижение продольной разнотенности труб на агрегатах с короткооправочными станами / М.И. Ханин // Metallургическая и горнорудная промышленность – 2013г. – №2 – С. 48-363.

85 Осадчий, В.Я. Качество труб на трубопрокатных установках с грибовидными и валковыми прошивными станами / В.Я. Осадчий // Metallург – 1968г. – №11 – С. 17-20.

86 Потапов, И.Н. Исследование разнотенности передних концов гильз / И.Н. Потапов, В.А. Попов, Б.А. Романцев // Научные труды Московского института стали и сплавов: Теория и технология деформации металлов – 1976 - №96 – с. 65-69

87 Полухин, П.И. Качество гильз из титановых сплавов при прокатке на трехвалковом стане / П.И. Полухин, И.Н. Потапов, Б.А. Романцев и др. // Научные труды Московского института стали и сплавов: Теория и технология обработки металлов давлением – 1982 - №142 – с. 93-97

88 Остренко, Я.В. Исследование разнотенности гильз при кривой прокатке / Я.В. Остренко, Ю.М. Миронов, В.И. Ермолов // Сталь – 1970г. – №8 – С. 728 – 732.

89 Данченко, В.Н. Качество бесшовных горячекатаных труб с учетом влияния колебания стержня оправки / В. Н. Данченко, С.Р. Рахманов // Сталь – 2009г. – №1 – С. 63 – 65.

90 Остренко, В.Я. Производство труб на автоматических установках/ В.Я. Остренко, П.И. Ватулин – Харьков: Metallургиздат, 1958. – 135с.



- 91 Окле́й, Л.П. Качество горячекатаных труб / Л.П. Окле́й – М.: Металлургия, 1986г. – 144 с.
- 92 Вавилкин, Н.М. Прошивная оправка / Н.М. Вавилкин, В.В. Бухмиров - М.: МИСИС, 2000 – 128 с.
- 93 Манегин, Ю.В. Оправки из тугоплавких металлов для прошивки высоколегированных сталей и сплавов / Бюллетень ЦИИН. – 1964. – №13(729). – С. 47-49.
- 94 Манегин, Ю.В. Стеклосмазки и защитные покрытия для горячей обработки металлов / Ю.В. Манегин, И.В. Анисимова – М.: Металлургия, 1978. – 223с.
- 95 Вавилкин, Н.М. Исследование силовых условий работы оправок при прошивке в стане винтовой прокатки / Н.М. Вавилкин, В.А. Попов, А.М. Степашин // Известия вузов Черная металлургия – 1992 г. – №7 – С. 36 – 39.
- 96 Орлов, С.И. Пути совершенствования калибровки оправок прошивных станков / С.И. Орлов // Производство сварных и бесшовных труб – 1965г. – №4 – С. 66 – 74.
- 97 Швейкин, В.В. Рациональная форма оправки прошивного стана / В.В. Швейкин // Известия вузов Черная металлургия – 1960г. – №8 – С. 81 – 87.
- 98 Миронов Ю.М. Геометрические параметры процесса кривой прокатки/ Ю.М. Миронов// Производство труб: сб. науч. тр. – УкрНИТИ: Металлургиздат – 1962 – вып. 6 – С. 37 – 46.
- 99 Меркулов, Д.В. Особенности прошивки заготовок в косовальковых станах разного конструктивного исполнения/ Д.В. Меркулов, Р.М. Голубчик, М.В. Чепурин// Труды IV международного конгресса прокатчиков в 2 т. – М: АО «Черметинформация» – 2002 – 2 т – С. 82 – 87.
- 100 Гуляев, Ю.Г. Определение геометрических параметров очага деформации в станах поперечно – винтовой прокатки/ Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, И.И. Лубе, Д.Ю. Гармашев, Ю.Н. Николаенко// Сталь – 2013 г. – №11 – С. 53 – 55.

101 Онучин, А.Б. Разработка и исследование эффективной технологии для производства полых заготовок из углеродистых и легированных сталей: автореферат дис. канд. техн. Наук/ А.Б. Онучин. – М., 2013 – 24 с.

102 Алещенко, А.А. Исследование и разработка методики проектирования технологического инструмента станов винтовой прокатки гильз и труб/ А.А. Алещенко. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 2010

103 Голубчик, Р.М. Совершенствование алгоритма расчета параметров циклического формоизменения при винтовой прокатке / Р.М. Голубчик, Д.В. Меркулов, М.В. Чепурин // Производство проката – 1999г. – №6 – С. 19 – 24.

104 Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка оптимальных калибровок инструмента и анализ загрузки основного технологического оборудования. ТПА080 «СинТЗ». Заключительный. /А.Н. Кириченко – №1653 Челябинск, 1983. – 56 с.

105 Чикалов, С.Г. Теоретические основы, исследование, разработка и внедрение высокоэффективных технологий производства бесшовных труб с использованием непрерывнолитой заготовки / С.Г. Чикалов – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва, 2004г.

106 Ровинский, Э.А. Исследование скоростных и энергосиловых условий процесса винтовой прокатки труб с применением приводных направляющих дисков / Э.А. Ровинский – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Челябинск, 1979г.

107 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». – 2015г. – №2 – С. 68 – 74.

108 Широков В.В. Опыт моделирования процессов производства труб с применением программы QFORME 2D/3D / В.В. Широков, А.В. Король, Е.В. Храмов и др. // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: Сб. науч. трудов. Екатеринбург: Из – во Урал. Ун-та – 2014г – С. 208 – 2211.

109 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012612810 Корх2 / А.В. Король, А.А. Корсаков, А.В. Курятников

110 Король А.В. / Методика определения настроечных параметров для прошивных станков с бочковидными валками // А.В. Король, А.А. Корсаков, Д.Ю. Звонарев – Сталь – 2011г. – №2 – С.62 – 64.

111 Король А.В. Разработка компьютерных программ для расчета настроечных параметров прошивных станков / А.В. Курятников, А.В. Король и др. // Труды юбилейной научно – технической конференции «Трубы – 2012» – Челябинск. ОАО «РосНИТИ», 2012 – Часть II – С. 41-43

112 A.V. Korol Improving processes of screw rolling in seamless hot-rolled pipe industry / Труды9 International Rolling Conference and 6th European Rolling Conference Rolling2013 Venice (Italy) June 10 – 12, 2013 наCD

113 Король А.В. Определение настроечных параметров процесса прошивки на двухвалковых станах винтовой прокатки/ А.В. Король, А.В. Выдрин// Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016г. – №2 – С. 74-80

114 Мульчин, В.В. Определение настроечных параметров на прошивных станах с направляющими приводными дисками (стан Дишера) / В.В. Мульчин, А.В. Зинченко, А.В. Король и др.// Сталь – 2010г. – №8 – С. 68 – 70

115 Король, А.В. Новые технические решения, обеспечивающие стабильное получение тонкостенной гильзы / А.В. Король // Труды научно – технической конференции «Трубы – 2014» – Челябинск. ОАО «РосНИТИ», 2014 – Часть II – С. 43-46

116 Курятников, А.В. Анализ схем деформирования процесса прошивки с относительно глубоким посадом из НЛЗ / А.В. Курятников, А.В. Король, Н.К. Худяков и др. // Труды научно-технической конференции «Трубы – 2011» – Челябинск. ОАО «РосНИТИ», 2011 – Часть II – С. 108-113

117 Курятников, А.В. Применение НЛЗ повышенного диаметра для производства труб на ТПА «140» / А.В. Курятников, А.В. Король, А.А. Корсаков и др. // Труды научно-технической конференции «Трубы – 2011» – Челябинск. ОАО «РосНИТИ», 2011 – Часть II – С. 132-135

118 Курятников, А.В. Разработка технологии производства труб диаметром от 73 до 121 мм из непрерывнолитой заготовки диаметром 150 (156) мм в условиях ТПА 140 ОАО «СинТЗ» / А.В. Курятников, А.В. Король, А.А. Корсаков и др. // Труды IX конгресса прокатчиков. – Череповец, 16-18 апреля 2013. – Т.1. – С. 130-134

119 Курятников, А.В. Оценка эффективности зацентровки непрерывнолитой заготовки перед ее винтовой прошивкой в условиях ОАО СТЗ / А.В. Курятников, А.В. Король, А.В. Топоров и др. // Сталь – 2014г. – №6 – С. 71 – 73.

120 Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.Л. Колмогоров.– М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

121 Добряк, В.Д. Инженерный метод определения параметров внедрения ударного инструмента в монолитную среду / В.Д. Добряк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1992. – №2. – С. 49-51.

122 Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П.Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

123 Король, А.В. Оптимизация формы бойка зацентровщика / А.В. Король, Михалкин Д.В.// Труды научно – технической конференции «Трубы – 2014» – Челябинск. ОАО «РосНИТИ», 2014 – Часть II – С. 259-263

124 Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

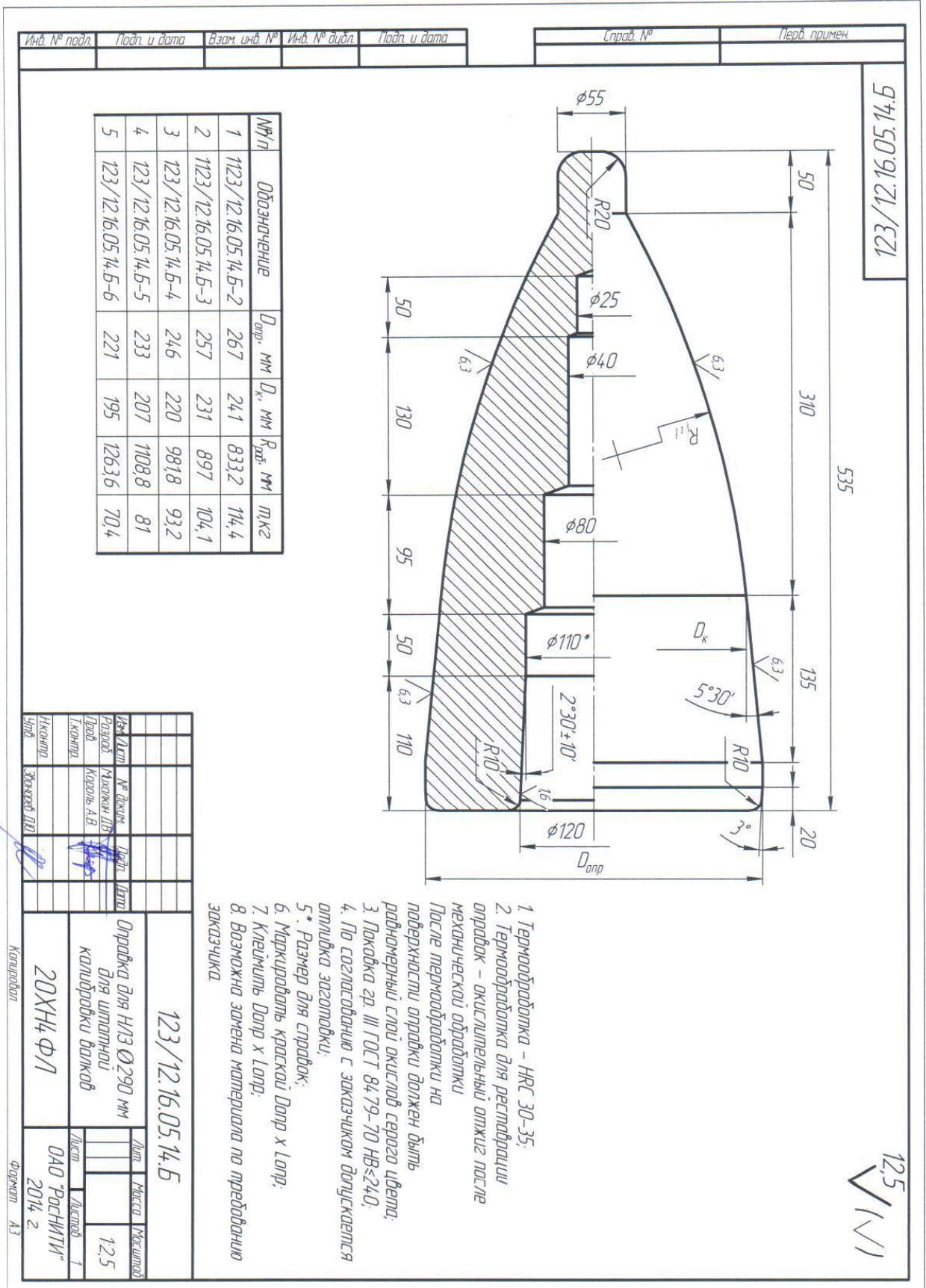
125 Патент РФ №2496590. Технологический инструмент косовалкового прошивного стана / И.Ю. Пышминцев, А.В. Курятников, А.А. Корсаков и др.

126 Выдрин, А.В. Экспериментальное исследование влияния формы оправок прошивного стана на их износостойкость / Выдрин А.В, Король А.В., Корсаков А.А. // Труды научно – технической конференции «Трубы – 2014» – Челябинск. ОАО «РосНИТИ», 2014 – Часть II – С. 156-159.

127 А.В. Король Анализ стойкости оправок на прошивном стане Дишера / А.В. Король, Д.Ю. Звонарев, А.В. Курятников и др. // Сталь – 2011г. – №2 – С. 59 – 61.



ПРИЛОЖЕНИЕ Б



1. Термообработка – НТС 30-35;
2. Термообработка для респирации  
оправки – окислительный отжиг после  
механической обработки
- После термообработки на  
поверхности оправки должен быть  
равномерный слой окислительного цвета;
3. Лакровка зр. III ГОСТ 8479-70 НВ≤240;
4. По согласованию с заказчиком допускается  
отливка заготовки;
- 5\* – Размер для справки;
6. Маркировать краской Допр х Лопр;
7. Клеймить Допр х Лопр;
8. Возможна замена материала по требованию  
заказчика.



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

«УТВЕРЖДАЮ»



Главный инженер ОАО «ВТЗ»

Н.В. Трутнев

10 2011 г.

АКТ  
внедрения программы для ЭВМ «Korx2»

Разработчики: А.В. Курятников, А.В. Король, А.А. Корсаков,  
Д.Ю. Звонарев.

Основание для разработки: Ограниченные возможности имеющегося программного обеспечения для расчета основных настроечных параметров прошивного стана. Невозможность оперативного корректирования при настройке прошивного стана с помощью твердотельного 3D моделирования. Необходимость в специалистах, владеющих САД системами.

Место внедрения: ТПА «159-426» (ТПЦ-3) ОАО «ВТЗ»

Форма внедрения: установка на ПК прокатного бюро технического управления, начальника горячего проката ТПЦ-3, калибровщиков цеха, пульта прошивного стана.

Дата начала тестирования: 01 сентября 2011 г.

Дата внедрения: 01 декабря 2011 г.

Результаты применения: сокращение времени на расчет настроечных параметров прошивного стана, возможность проектирования нового прокатного инструмента прошивного стана.

Эффективность внедрения: программа удобна в использовании, не требует от оператора специальных навыков (знание САД систем), позволяет сократить время настройки прошивного стана и снизить расход металла за счет уменьшения количества настроечных заготовок.

Начальник ТУ

Д.В. Лоханов

Начальник ТПЦ-3

О.В. Сердюк



«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер ОАО «ВТЗ»

Н.В. Трутнев

« 31 » 10 20 14 г.

АКТ

**внедрения методики твердотельного 3D моделирования процесса прошивки при освоении прошивного стана в трубопрокатном цехе № 3 «Волжского трубного завода»**

В настоящее время на ОАО «ВТЗ» освоили производство непрерывно-литой круглой заготовки, что позволило отказаться от пресс - валковой прошивки, и операция прошивки осуществляется на прошивном стане, реализующего классическую схему двухвалковой винтовой прошивки с бочковидными валками и с направляющими неподвижными линейками.

В связи с изменением технологии производства труб в ТПЦ-3 в 2010 году проходило освоение новой технологии.

В освоении производства труб на реконструированном ТПА принимали участие аспиранты кафедры «Машины и технологии обработки материалов давлением» «Южно-Уральского государственного университета».

Аспиранты: Король А.В. и Корсаков А.А., разработали методику твердотельного 3D моделирования процесса прошивки, которая позволила специалистам завода:

- производить настройку и перенастройку прошивного стана в период освоения новой технологии, при отсутствии устоявшихся таблиц настройки для нового прокатного инструмента прошивного стана;
- проектировать новый прокатный инструмент прошивного стана, в том числе для получения гильз под новые калибры непрерывного стана;
- сократить расход металла за счет уменьшения количества настроечных заготовок.

В настоящее время разработанная методика применяется специалистами ОАО «ВТЗ» для проектирования нового прокатного инструмента прошивного стана, а так же при необходимости перенастройки прошивного стана на новые размеры гильз, отсутствующих в таблицах прокатки.

Начальник ТУ

Д.В. Лоханов

Начальник ТПЦ-3

О.В. Сердюк





«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор ПАО «СТЗ»

В.А. Топоров

«    »    2015 г.

АКТ

**промышленного исследования новой технологии получения  
тонкостенных гильз на прошивном стане ПАО «СТЗ»**

В 2013 – 2014 г. аспирантом кафедры «МиТОМД» ГОУ ВПО «ЮУрГУ» А.В. Королем была разработана и совместно со специалистами ПАО «СТЗ» исследована новая технология получения тонкостенных гильз на прошивном стане с грибовидными валками и направляющими линейками, обеспечивающая производство гильз для последующего передела на непрерывном стане.

Новая технология включает разработку калибровок прокатного инструмента прошивного стана, режимов деформации и основана на новых математических моделях прошивного стана, позволяющих определять:

- настроечные параметры прошивного стана;
- калибровку прокатного инструмента прошивного стана.

Математические модели прошли апробацию для получения тонкостенных гильз.

В результате проведенных исследований на прошивном стане получены тонкостенные гильзы с повышенными требованиями по геометрическим размерам.

Начальник технического отдела

В.Л. Пятков

Начальник научно-исследовательского центра

А.И. Степанов

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер ОАО «СинТЗ»

В.А. Гагаринов

2015 г.



АКТ

**промышленного исследования новой технологии прошивки  
непрерывнолитых заготовок в гильзы с уменьшением наружного  
диаметра**

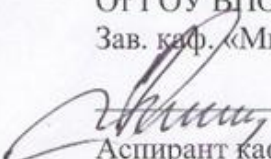
В 2012 г. аспирантами кафедры «МиТОМД» ГОУ ВПО «ЮУрГУ» А.В. Королем и А.А. Корсаковым была разработана и совместно со специалистами ОАО «СинТЗ» исследована новая технология винтовой прошивки непрерывнолитых заготовок с уменьшением наружного диаметра гильз на двухвалковом стане винтовой прокатки ТПА-140 с грибовидными вальками и направляющими линейками.

Новая технология включает изменение калибровок прокатного инструмента прошивного стана (валков, оправки, линеек) и режимов деформации.

В результате проведенных исследований показана принципиальная возможность осуществления процесса прошивки непрерывнолитых заготовок с уменьшением наружного диаметра гильз до 13%.

От ГОУ ВПО ЮУрГУ:

Зав. каф. «МиТОМД», д.т.н., профессор


 В.Г. Шеркунов

Аспирант кафедры «МиТОМД»


 А.В. Король

Аспирант кафедры «МиТОМД»


 А.А. Корсаков

От ОАО «СинТЗ»:


Главный прокатчик


 С.В. Липнягов

Начальник ЦЗЛ


 Е.М. Засельский

Начальник цеха Т-2


 Д.В. Гурков



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе



А.А. Радионов

2016 г.

АКТ

внедрения результатов кандидатской диссертационной работы  
Короля Алексея Валентиновича в учебный процесс  
на кафедре МиТОМД ФГБОУ ВПО «ИУрГУ» (НИУ)

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе результатов кандидатской диссертационной работы Короля А.В. выполненной на тему «Совершенствование двухвалковой винтовой прошивки на основе моделирования и разработки новых технических решений».

Представленные в диссертационной работе расчёты параметров процесса двухвалковой винтовой прошивки внедрены в учебный процесс при профессиональной переподготовке специалистов АО «ВТЗ» в 2013-2015 годах по программе «Обработка металлов давлением» специализации «Трубное производство», разработанной ФГБОУ ВПО «ИУрГУ» (НИУ).

Кроме того, материалы, связанные с математическим описанием процесса прошивки, проектированием линеек, оправок и оптимизации технологического процесса используются при чтении лекций в курсе «Теория обработки металлов давлением» студентам, обучающимся по направлению 22.04.02.5 «Металлургия», и в курсе «Оборудование трубных цехов» у студентов направления 15.04.02.1 «Технологические машины и оборудование».

Зав. кафедрой МиТОМД

В.Г. Шеркунов