

На правах рукописи



Король Алексей Валентинович

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Челябинск 2016г.

Работа выполнена на кафедре «Процессы и машины обработки металлов давлением» (ПиМОМД) в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)) и в Открытом акционерном обществе «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»)

Научный руководитель – Выдрин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Смирнов Сергей Витальевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук» (ИМАШ Уро РАН).

Павлов Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО «УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина»), г. Екатеринбург.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Защита диссертации состоится 14 декабря 2016 г. в 12-00 часов, ауд 1001 на заседании диссертационного совета Д212.298.01 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)

по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет. Тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-92-28.

e-mail: korol@rosniti.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) и в сети Интернет по адресу: <http://susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/korol-aleksey-valentinovich>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Шабурова Наталия Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время для производства труб на современных трубопрокатных агрегатах необходимо получать гильзы с жесткими требованиями по геометрической точности и с обеспечением качества на наружной и внутренней поверхностях.

Наиболее перспективным способом получения гильз является операция прошивки на двухвалковых станах винтовой прокатки, работающих на повышенных углах подачи. Двухвалковая винтовая прошивка обладает бесспорным преимуществом по точности получаемых гильз по сравнению с другими способами прошивки.

Однако, при освоении технологии получения гильз (особенно тонкостенных) с относительно большим «подъемом» и «посадом» наружного диаметра (больше 10%) из непрерывнолитой заготовки относительно большего диаметра возникли 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. 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 высокой степени и скорости деформирования заготовки.

Высокая гибкость процесса двухвалковой винтовой прошивки и широкий диапазон изменения настроечных параметров прошивных 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 эксплуатации трубопрокатных агрегатов разработаны рациональные области изменения, для создания новых технологий двухвалковой винтовой прошивки 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.

Следует отметить, что на качество гильз влияет дополнительная операция – зацентровка. Наличие центровочного отверстия у заготовки способствует улучшению точности получаемых гильз и условий вторичного захвата. С другой стороны, неправильная зацентровка приводит к образованию дефектов. При получении тонкостенных гильз размер оправки весьма значительные, поэтому необходимо наносить достаточно большое и глубокое отверстия (диаметр основания выше 100 мм), что приводит к необходимости значительных усилий со стороны зацентровщика.

Целью 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 станков; повышение стойкости оправок прошивных станков.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи** исследования:

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 станков.

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.

Научная новизна.

1. На основе численного исследования напряженно-деформированного состояния заготовки при двухвалковой винтовой прошивке выявлен характер изменения напряжений в центральной зоне заготовки и определено влияние основных настроечных параметров процесса прошивки на напряженно-деформированное состояние заготовки.

2. Получены новые аналитические зависимости для расчёта геометрических параметров очага деформации при двухвалковой винтовой прошивке, учитывающие его искажение, вызванное разворотом валков на угол подачи и раскатки.

3. Получены новые аналитические зависимости для расчета профиля линейки, позволяющие разрабатывать их калибровку.

4. Получены новые аналитические зависимости для расчета величины зазора между оправкой и внутренним диаметром гильзы, позволяющие разрабатывать калибровку оправок.

5. Определены оптимальные значения параметров настройки прошивного стана, обеспечивающих минимизацию машинного времени.

6. Определена оптимальная форма бойка зацентровщика, обеспечивающая минимизацию усилия зацентровки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработанные математические модели по настройке прошивного стана, калибровки оправок и линеек прошли успешную апробацию при пуске прошивного стана ЭЗТМ на ПАО «СТЗ». На основе математических моделей создана технология получения гильз повышенной точности: отклонение наружного диаметра гильзы $\pm 1\%$; отклонение толщины стенки гильзы $\pm 5\%$.

Разработанный алгоритм настройки прошивных станков с учетом ограничений процесса реализован в программном продукте «Korx2» и в методике твердотельного моделирования винтовой прошивки, используется с момента пуска прошивного стана ТПА 159-426 АО «ВТЗ» по настоящее время.

Математическая модель «Оптимизация процесса прошивки» может использоваться при проектировании новых трубопрокатных агрегатов, в частности для повышения их производительности.

Математическая модель «Оптимизация операции зацентровки» может использоваться при разработке оборудования зацентровщиков.

Разработана и запатентована новая форма оправки прошивного стана, способствующая повышению ее стойкости.

Результаты работы внедрены в учебный процесс по профессиональной переподготовке специалистов АО «ВТЗ» в 2013-2015 г. по программе «Обработка металлов давлением» специализации «Трубное производство». 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».

Методы исследований и достоверность полученных результатов. Для исследования процессов двухвалковой винтовой прошивки использовалось физическое и математическое моделирование.

Математическое моделирование проводилось с использованием лицензионной программы QForm 3D, основанной на методе конечных элементов, при этом построение геометрических моделей прокатного инструмента и очагов деформации осуществлялось в САД системе трехмерного твердотельного моделирования КОМПАС-3D. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными опытно-промышленных испытаний на ПАО «СТЗ», АО «ВТЗ», ПАО «СинТЗ».

Также при математическом моделировании использовались методики теории решения оптимизационных задач.

Личный вклад автора заключается в:

1. Выдвижении основных идей, их научном обосновании.
2. Личном участии в экспериментальных опытно – промышленных испытаниях.
3. Непосредственном участии в анализе и интерпретации полученных результатов.

4. Инициировании и написании научных трудов по теме диссертации, выдвижении идей для выступлений с докладами на научно-технических конференциях и семинарах.

Апробация работы. Основные результаты исследований опубликованы в ряде научно-технических изданий и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе, международных: «Трубы-2011», «Трубы-2012», «Трубы-2014» (г. Челябинск); «VI Молодёжная научно-практическая конференция ТМК» (г. Сочи, 2010 г.); «X Молодёжная научно-практическая конференция ТМК» (г. Сочи, 2014 г.); XVII Международная промышленная выставка Металл-Экспо 2011 (г. Москва, 2011 г.); IX Конгресс прокатчиков (г. Череповец, 2013 г.) 9th International Rolling Conference and 6th European Rolling Conference ROLLING2013 (Venice, 2013); Научный семинар кафедры «МиТОМД» (г. Челябинск, 2013 г.) XVII Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий Архимед (г. Москва 2014 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 18 печатных работах, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, получен 1 патент РФ на изобретение и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, изложена на 139 страницах машинописного текста, включающего 55 рисунков, 20 таблиц, список использованных источников из 127 наименований отечественных и зарубежных авторов, 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность тематики исследования, сформулированы цель работы и задачи исследования.

В первой главе на основе обзора научно – технической литературы представлены особенности технологии двухвалковой винтовой прошивки.

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 параметрах процесса.

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.

3. 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 сечения 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.

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.

5. Увеличение точности гильз в настоящее время достигается несколькими способами: подготовка заготовки перед прошивкой (нагрев заготовки, зацентровка, рациональная порезка штанг и т.д.); создание устойчивой системы удержания оправки в очаге деформации; применение зацентровки торцов заготовки.

6. В теории и практике трубного производства вопросы точности гильз рассматривали с позиции изменения калибровки валков и оправок, настроечных параметров. Но влияние каждого из параметров технологии прошивки 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 вводятся 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 зависимости по определению величины «разбоя» получены на основе экспериментальных данных.

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

Во второй главе представлены теоретические исследования двухвалковой винтовой прошивки.

Одной из основных проблем, связанной с винтовой прошивкой, является ухудшение качества внутренней поверхности гильзы в результате разрушения центральной зоны заготовки из-за действия растягивающих напряжений. Для исследования характера изменения напряжений в осевой зоне заготовки проведено компьютерное моделирование (в программе QForm 3D) процесса прошивки на двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими неподвижными линейками, которое позволило объяснить характер изменения напряженно-деформированного состояния металла при винтовой прокатке за один оборот заготовки. На рисунке 1 показаны напряжения в центре заготовки, которые являются растягивающими, и изменения напряжений носит циклический характер.

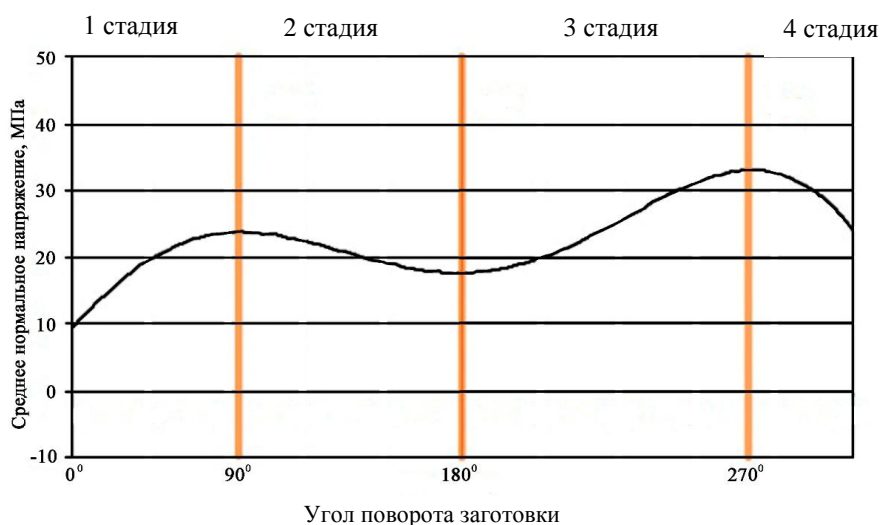


Рисунок 1 – Осевые растягивающие напряжения в центре заготовки при винтовой прокатке

Для анализа изменения напряженного состояния металла заготовки при винтовой прокатке за один полный оборот процесс разбит на четыре стадии (рисунок 2):

– стадия 1: в момент контакта заготовки с валком усилия, действующие на нее со стороны инструмента, имеют сосредоточенный характер и сжимающие напряжения малы (рисунок 2, а).

В связи с этим, сжимающие напряжения в период контакта заготовки с валками не оказывают влияния на напряженное состояние центральной зоны. В результате в осевой зоне преобладающее влияние оказывают растягивающие напряжения, которые достигают своего максимума за $\frac{1}{4}$ оборота заготовки.

– стадия 2: $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ оборота заготовки. Уменьшается доля растягивающих напряжений в поверхностных слоях заготовки, так как возникают сжимающие напряжения из-за действия валков на соседний, набегающий объем металла (рисунок 2, б).

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

– стадия 3: $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$ оборота заготовки. В поверхностных слоях наблюдается уменьшение сжимающих напряжений (рисунок 2, в) и интенсивный рост реакционных растягивающих.

Максимальное значение растягивающих напряжений достигается за $\frac{3}{4}$ оборота заготовки;

- стадия 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 2, г).

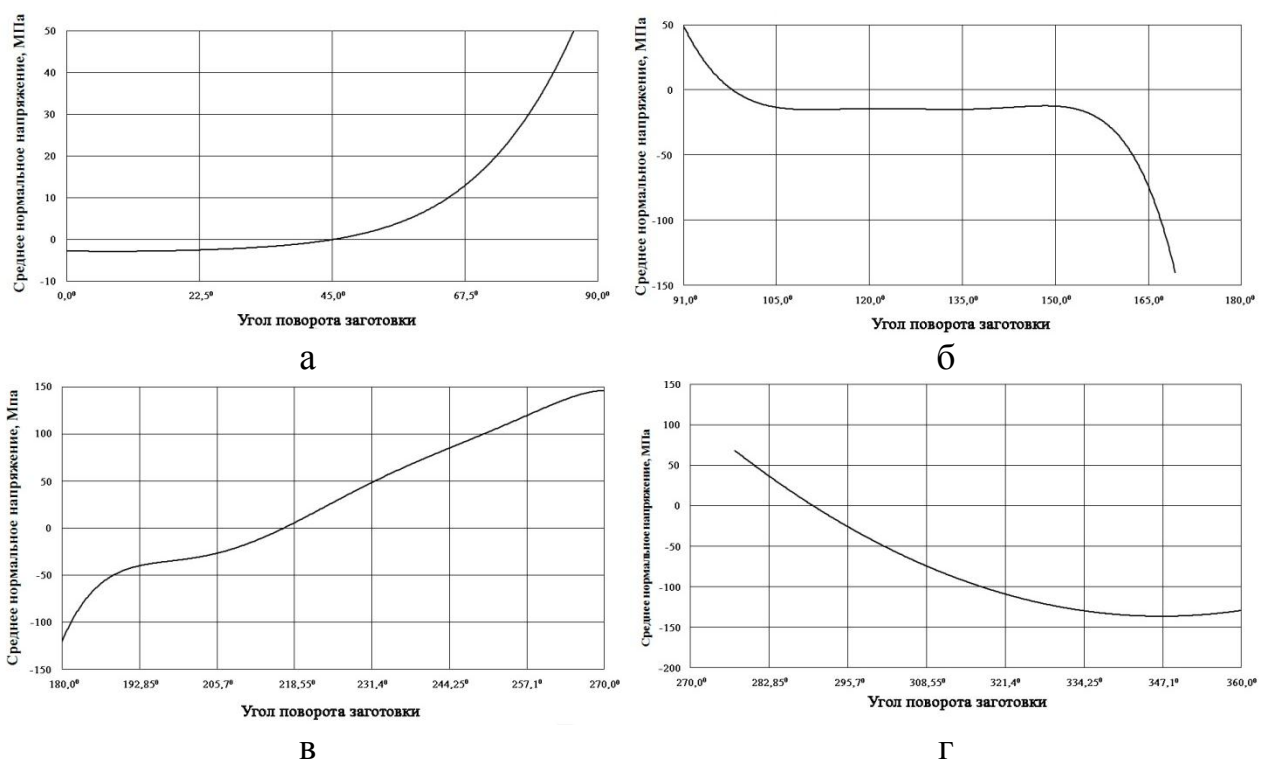


Рисунок 2 – Среднее нормальное напряжение в поверхностных слоях заготовки: а – в первой стадии процесса; б – во второй стадии процесса; в – в третьей стадии процесса; г – в первой стадии процесса

С каждым последующим оборотом заготовки значение экстремумов напряжений 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 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 результате моделирования было определено влияние оправки на напряженно-деформированное состояние центральной зоны заготовки. Возникают сжимающие напряжения из-за наличия подпирающих сил со стороны оправки.

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 (рисунок 3).

С увеличением угла подачи растягивающие напряжения увеличиваются. Это связано с повышением частного обжатия за счет увеличения шага осевой подачи. Но с другой стороны, с увеличением угла подачи увеличиваются сжимающие напряжения перед носком оправки, 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 не более одного оборота до встречи с торцом оправки, но не меньше $\frac{3}{4}$ оборота, иначе возникнут проблемы со вторичным захватом.

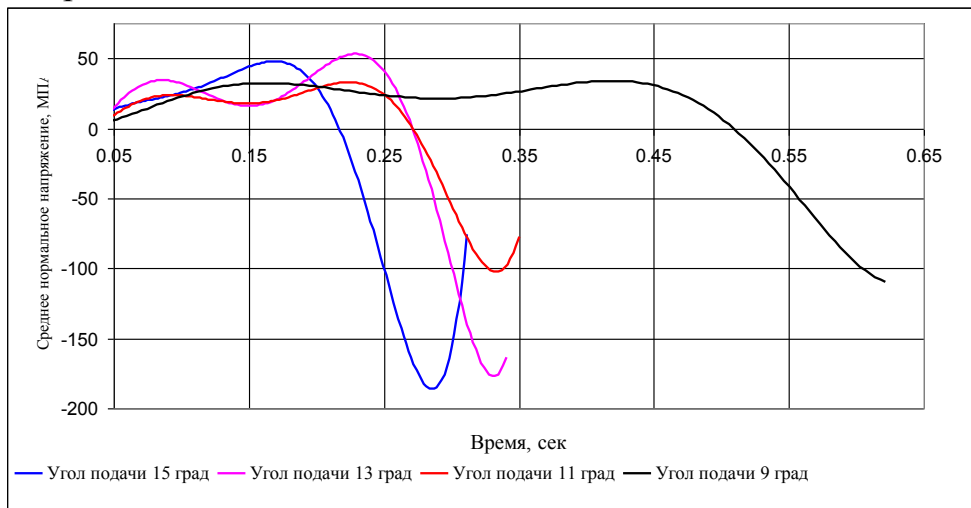


Рисунок 3 – Изменение среднего нормального напряжения в середине заготовки при прошивке на различных углах подачи

При помощи моделирования с использованием программного продукта 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 4).

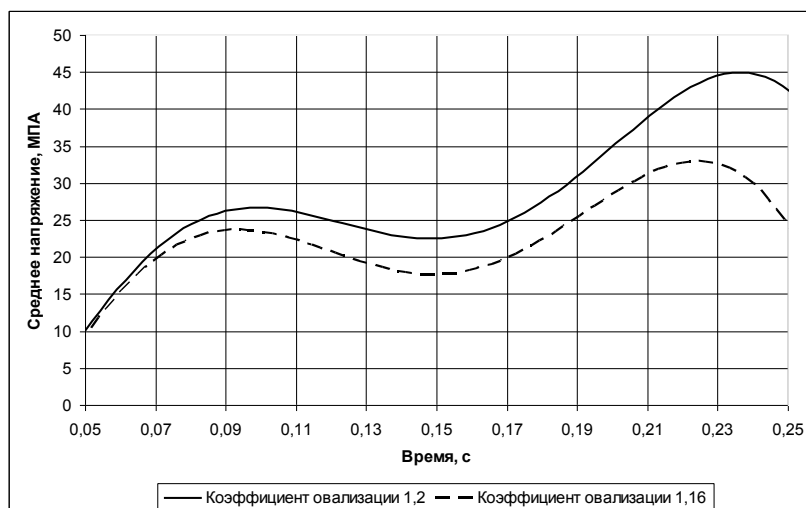


Рисунок 4 – Влияние коэффициента оваллизации на растягивающие напряжения в центральной зоне заготовки при ее прошивке

С увеличением коэффициента оваллизации увеличиваются растягивающие напряжения в центральной зоне заготовки. При повышенном коэффициенте оваллизации 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.

В данной главе также проведено математическое моделирование процесса двухвалковой винтовой прошивки. Создан комплекс математических моделей необходимых для создания технологии двухвалковой винтовой прошивки, обеспечивающей получения тонкостенных гильз с высокой точностью геометрических размеров и качеством поверхностей гильзы.

Для описания очага деформации с учетом его искажения из-за разворота валков на угол подачи и раскатки получены математические зависимости между длиной очага деформации и расстоянием от оси прокатки до поверхности валков для конуса прошивки $r_x(x_{od})$:

$$r_x(x_{od}) = \sqrt{(R'_0 + r_0 - \frac{x_{od} \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta})^2 + x_{od}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} - R'_0 + \frac{x_{od}}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} \cdot (\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{b1} - \varphi)); \quad (1)$$

для конуса раскатки:

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

где β - угол подачи; α_{b1} - угол валка в конусе прошивки; α_{b2} - угол валка в конусе раскатки; φ - угол раскатки; R'_0 - кратчайшее расстояние от оси валка до заготовки в оси поворота; r_0 - радиус заготовки в оси поворота; x_{od} - длина очага деформации.

При выводе математических зависимостей использовалось допущение: изменение радиуса валка в его основной меридиональной плоскости незначительное. Для оценки погрешности, обусловленной принятым допущением,

с использованием программного продукта Компас – 3D было проведено твердотельное моделирование процесса прошивки на двухвалковом стане винтовой прокатки с грибовидными валками при различных углах подачи. 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.

На основе полученных зависимостей разработана методика по определению основных настроечных параметров процесса винтовой прошивки, 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.

Для повышения точности гильз разработана математическая модель по проектированию направляющих линеек. Для повышения точности получаемых гильз предлагается снизить уровень внеконтактной деформации при прошивке и тем самым уменьшить овальность гильзы. Это достигается за счет профилировки 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:

$$R = r_z \cdot (1 - \varepsilon_p) \cdot \xi_p + \frac{\rho_{\varphi_c}^2 - r_z^2 \cdot (1 - \varepsilon_p)^2 \cdot \xi_p^2}{2 \cdot \left(r_z \cdot (1 - \varepsilon_p) \cdot \xi_p - \rho_{\varphi_c} \cdot \cos \left(\varphi_c - \frac{\pi}{2} \right) \right)}, \quad (3)$$

где r_z - радиус заготовки; ε_p - относительное обжатие заготовки в пережиме валков; ξ_p - коэффициент овализации в пережиме валков; φ_c - угол меридионального сечения заготовки; ρ_{φ_c} - радиус логарифмической спирали, соответствующий углу φ_c .

При численном исследовании по данной зависимости было определено, что 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. Это связано с уменьшением шага осевой подачи заготовки за ее полуоборот и увеличением овальности заготовки – гильзы в очаге деформации.

Для повышения точности толщины стенки и внутреннего диаметра тонкостенных гильз разработана математическая модель для проектирования калибровки оправок. 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. Повышение точности гильзы достигается за счет применения новой математической зависимости по определению величины зазора между диаметром оправки и внутренним диаметром гильзы и («разбоя»):

$$2 \cdot (r_g - t_g) - 3 \cdot \left(r_g - \frac{\Delta}{2} - t_g + \left(r_p \cdot \xi_p + \left(\frac{r_g - \frac{\Delta}{2} - r_p}{\operatorname{tg} \alpha_b} \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_l \right) - t_g \right) + \quad (4)$$

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

где Δ - разница между диаметром оправки и внутренним диаметром гильзы («разбой»); r_g - радиус гильзы; t_g - толщина стенки гильзы; r_p - радиус заготовки в пережиме валков; ξ_p - коэффициент овализации в пережиме валков; α_l - угол конуса линейки в выходном конусе очага деформации; α_b - угол конусности очага деформации по валку с учетом разворота на угол подачи в выходном конусе очага деформации.

Анализ данной методики показывает, что на величину «разбоя» значительное влияние оказывают диаметр прошиваемой заготовки, коэффициент овализации и относительное обжатие заготовки в пережиме валков.

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.

Критерием оптимизации является минимизация машинного времени прошивки. Управляющими параметрами являются: угол подачи валков, относительное обжатие в пережиме валков. Целевая функция имеет вид:

$$T(\beta, \varepsilon_p) = \frac{L_z \cdot \lambda \cdot 90 + 90 \cdot \left[\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_z(1 - \varepsilon_p)} \cdot r_z \cdot \varepsilon_p} - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 + \right.}{\eta_0 \cdot \pi \cdot n \cdot \sin \beta \cdot [3 \cdot R_p - \cos \beta \cdot [(\sqrt{(\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1)^2 + \frac{2 \cdot \sin^2 \beta}{R_p + r_z(1 - \varepsilon_p)} \cdot r_z \cdot \varepsilon_p} - \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha_1) \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 + \quad (5)$$

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

где λ - коэффициент вытяжки на прошивном стане; L_z - длина заготовки; η_0 - коэффициент осевой скорости; n - частота вращения валков; R_p - радиус валка в пережиме валков.

Система ограничений включает в себя следующие: условие осевого вытягивания и вращения заготовки; условия вторичного захвата для угла подачи; условия вторичного захвата для обжата перед носком оправки; условия уменьшения вероятности образования разрушения перед носком оправки; условия по допустимому коэффициенту овализации; условия достаточной длины бочки валка в конусе прошивки; условия достаточной длины в конусе раскатки.

Для решения оптимизационной задачи использовался градиентный метод.

Кроме настроечных параметров, на качество гильз влияет дополнительная операция – зацентровка. При получении тонкостенных гильз диаметр оправки и ее форма весьма значительные, поэтому необходимо наносить достаточно большое и глубокое зацентровочное отверстие (диаметр основания выше 100 мм), что приводит к необходимости значительных усилий со стороны зацентровщика. Поэтому в работе решена оптимизационная задача по минимизации усилия зацентровки.

Соответственно, в качестве критерия оптимизации для операции передней зацентровки выбрана усилие зацентровки. Управляющими параметрами являются: угол конусности бойка, длина рабочей поверхности бойка. Целевая функция имеет вид:

$$P(\alpha, h) = \tau_s \cdot \left(1 + 3 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot \frac{\sin \frac{\alpha}{4}}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right) \cdot \pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \tau_s \cdot h^2 \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot \left(1 + \frac{\sin \alpha}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right) \quad (6)$$

где; α – полуугол клина в продольном сечении; τ_s – сопротивление металла пластической деформации сдвига; h - длина рабочей поверхности бойка.

Система ограничений включает в себя следующее: условие сохранения эффекта «подпрессовки»; условие исключения влияния утяжины; условие исключения образования разрушения при прошивке; условие, учитывающее отклонение стержня от оси прошивки.

Для решения оптимизационной задачи использовался классический метод Гаусса – Зейделя.

В третьей главе представлен анализ стойкости оправок прошивного стана и разработано техническое решение по повышению стойкости оправок.

На рисунке 5 показана гистограмма стойкости оправок прошивного стана, где по оси абсцисс отложено количество проходов с интервалом $h=50$ проходов, а по оси ординат – количество оправок (наблюдения), попадающих в частичные интервалы.

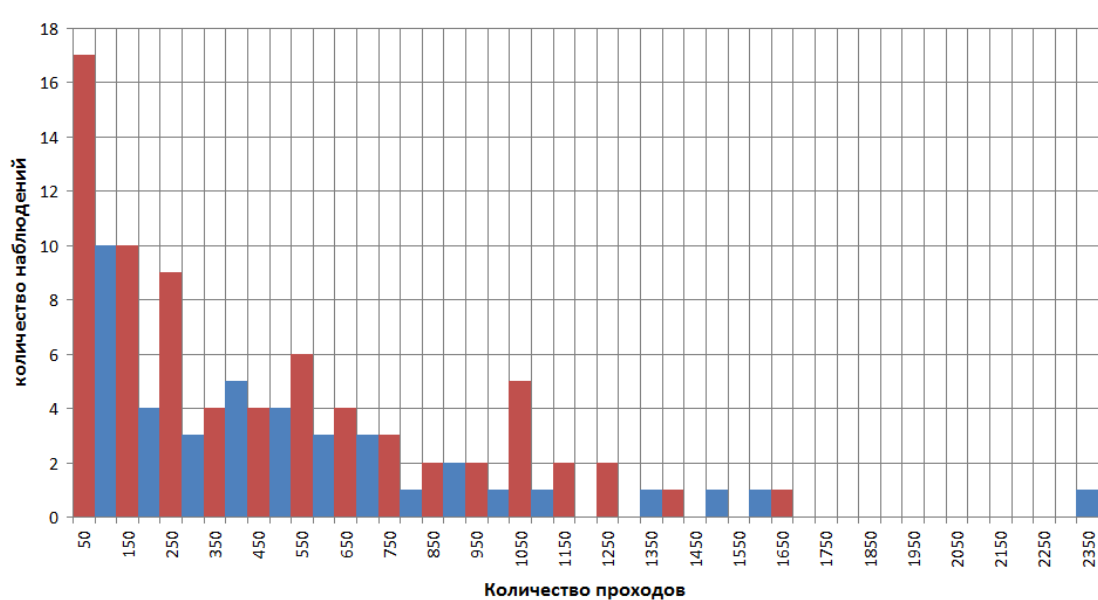


Рисунок 5 - Гистограмма стойкости оправок прошивного стана

На рисунке 6 показан график эмпирической функции распределения. Так как функция не имеет ярко выраженного купола и имеет убывающий характер, то предполагается, что стойкость оправок имеет показательное (экспоненциальное) распределение.

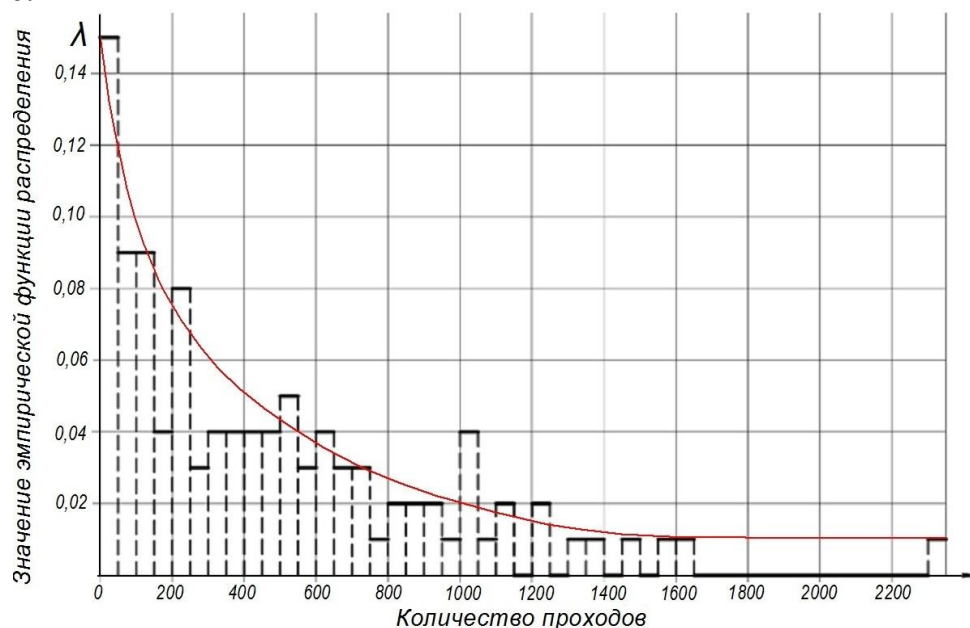


Рисунок 6 – Значение эмпирической функции распределения

Для проверки гипотезы о показательном распределении стойкости оправок произведена оценка согласованности выбранного теоретического распределения со статистической выборкой данных в соответствии с критерием Пирсона.

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. Таким образом, периоды выбраковки изношенных оправок характеризуются непредсказуемостью.

Проведен анализ по влиянию различных факторов на стойкость оправок, из которого следует, что на стойкость оправок существенное влияние оказывает длина гильз (Рисунок 7). Наибольшая стойкость наблюдается при прошивке гильз длиной 6 - 8 метров.

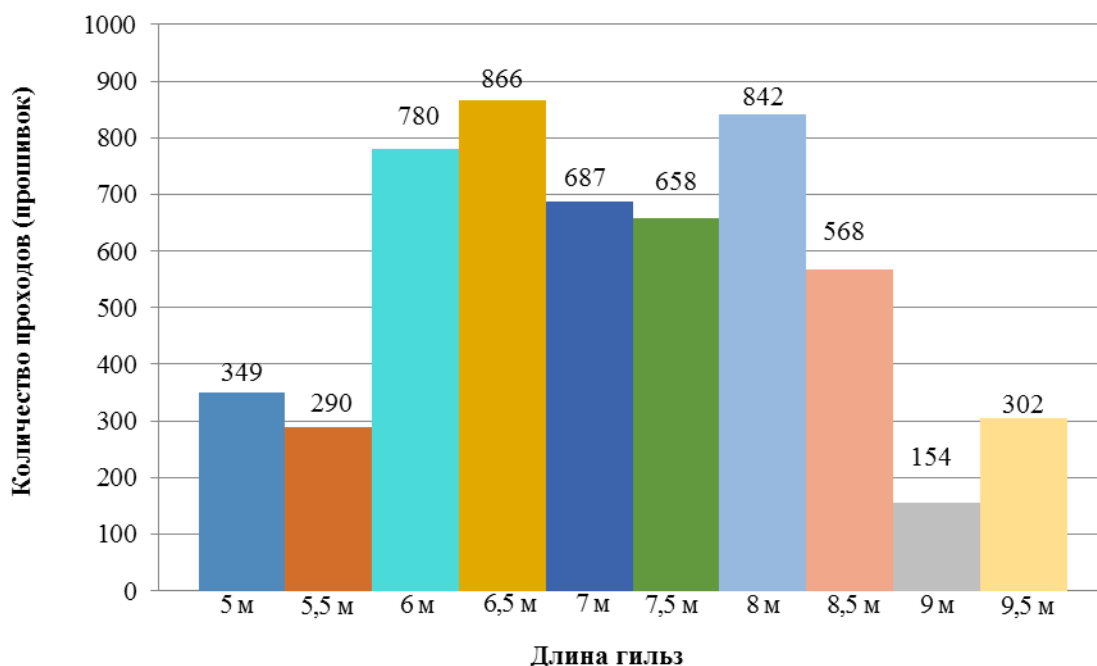


Рисунок 7 - Диаграмма средней стойкости оправок прошивного стана в зависимости от длины получаемых гильз

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 вышеперечисленных факторов.

Для повышения стойкости оправок предложено техническое решение, основанное на изменении формы рабочей поверхности оправок.

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 8).

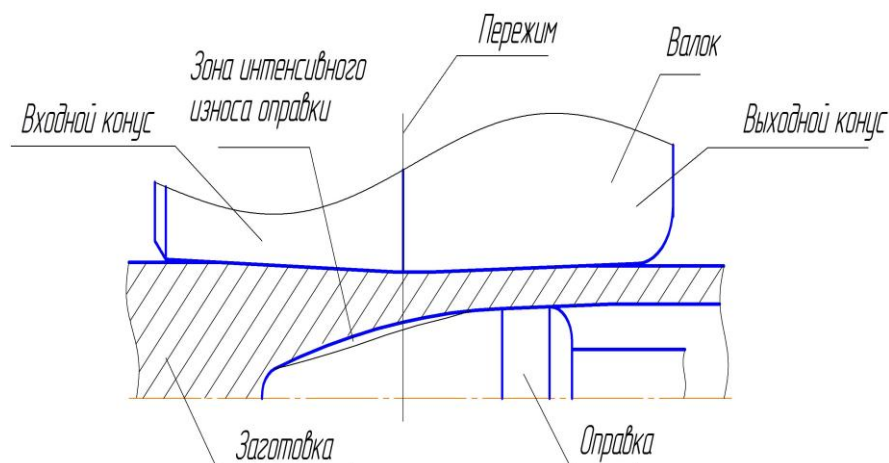


Рисунок 8 – Схема очага деформации при прошивке

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 усилием металла на инструмент, интенсивным скольжением, разогревом неподвижного инструмента трения: оправки и линеек 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 9.

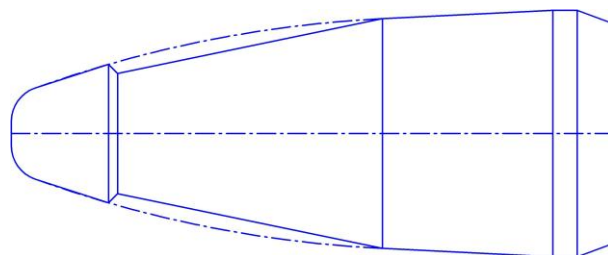


Рисунок 9 – Оправка новой формы

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 усилия 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.

В четвертой главе представлены результаты опытно-промышленных прокаток.

На трубoproкатном агрегате ТПА 159 – 426 АО «ВТЗ» проведены опытно-промышленные прокатки по испытанию новой формы оправки.

На экспериментальной оправке диаметром 243 мм для получения трубы размером 245x8,94 мм было прошито 779 заготовок; на одной оправке стойкость действующих оправок составила 113-397.

На прошивном стане ТПЦ-3 стойкость оправок значительно зависит от марки стали прошиваемого металла. При производстве труб размером 244,48x11,99 из стали 25ХМ1ФБА (наиболее проблемной марки стали с точки зрения стойкости оправок) стойкость оправок как на действующих, так и на экспериментальных оправках резко снизилась. Но даже при прокатке данной марки стали эффект от новой формы оправки очевиден: действующие оправки простояли 12-18 проходов; экспериментальные – 28 и 50 проходов.

Так же были проведены опытные работы по получению труб (экспериментальная оправка диаметр 238 мм) размером 273x22 мм (гильза 342-344 с толщиной стенки 43 мм) из сталей 13ХФА и 20 КТ.

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.

На Северском трубном заводе в 2014 году запускалась высокотехнологичная трубoproкатная линия по производству бесшовных труб с раскатным непрерывным станом «FQM» (Fine Quality Mill) фирмы «Danieli».

Согласно контрактным требованиям фирмы «Danieli» необходимо получить гильзы со следующими геометрическими отклонениями: наружного диаметра гильзы $\pm 1\%$; толщины стенки $\pm 5\%$.

На основе полученных в работе математических моделей были разработаны калибровки линеек и оправок для получения тонкостенных гильз диаметром 328 мм из заготовки диаметром 290 мм.

На ПАО «СТЗ» было проведено гарантийное испытание технологических режимов прошивки и прокатного инструмента прошивного стана (оправок и линеек). Гарантийные испытания проводились для получения тонкостенной

гильзы с наружным диаметром 328 мм и толщиной стенки 23,7 мм из заготовки диаметром 290 мм.

Экспериментальный прокат проводился в потоке производства труб $\text{Ø}245 \times 8,9$ мм на пилигримовых станах с использованием НЛЗ $\text{Ø}290$ мм (сталь марки Д) длиной 2600 мм.

Все замеры отклонения наружного диаметра и толщины стенки укладываются в допуски, установленными фирмой-изготовителем непрерывного стана Danieli.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате выполненной диссертационной работы достигнута поставленная 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.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:

1 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.

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

3 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

4 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

5 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.

6 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.

7 Развитие методов математического моделирования процессов деформации в производстве бесшовных труб / Выдрин А.В., Широков В.В.,

Яковлева К.Ю., Зинченко А.В., Король А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 107–115.

Основные публикации в научных изданиях, не входящих в список ВАК РФ:

8 Широков В.В. Опыт моделирования процессов производства труб с применением программы QFORME 2D/3D / В.В. Широков, А.В. Король, Е.В. Храмков и др. // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: Сб. науч. трудов. Екатеринбург: Из – во Урал. Ун-та – 2014г – С. 208 – 211.

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

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

11 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

12 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

13 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

14 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

15 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

16 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.

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

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

Подписано в печать «__» _____ 2016 г.

Формат 60x48 1/16

Печать – офсетная.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в _____