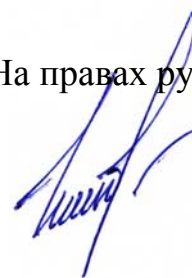


На правах рукописи



Шкуратов Евгений Александрович

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ РАСКАТКИ ГИЛЬЗ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ
БЕСШОВНЫХ ТРУБ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2017

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,
кафедра «Процессы и машины обработки металлов давлением» «ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», профессор

Официальные оппоненты:

Коновалов Анатолий Владимирович, доктор технических наук, профессор, лаборатория механики деформаций ИМАШ УрО РАН «Институт машиноведения Уральского отделения РАН», заведующий лабораторией.

Серебряков Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.Н. Носова».

Защита диссертации состоится 13 декабря 2017 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.01 при ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд 1001.

С диссертацией можно ознакомиться

в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» и на сайте:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/shkuratov-evgeniy-aleksandrovich>

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: Shkuratov@rtural.ru; Shkuratov@rosniti.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Шабурова Наталия Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время одной из приоритетных и ключевых задач для производителей горячедеформированных бесшовных труб является создание технологии массового производства продукта, отвечающего уникальным требованиям, предъявляемым к точности геометрических параметров. В связи с этим совершенствование технологии прокатки должно быть направлено, в первую очередь, на поиск технических решений, способствующих повышению точности геометрических параметров готовых труб.

Основной тенденцией мирового развития трубопрокатного производства является применение в линии трубопрокатного агрегата (ТПА) непрерывного раскатного стана продольной прокатки. Форма калибров непрерывного раскатного стана оказывает существенное влияние на точность труб по толщине стенки и на напряженно-деформированное состояние металла раската в процессе прокатки. Неблагоприятная схема напряжений на локальных участках раската может приводить к появлению и развитию дефектов в виде поперечных разрывов, образующихся в выпусках калибра. Снижение неравномерности деформации достигается за счет увеличения количества валков в клети, образующих калибр, поэтому в последнее время все большее применение находят непрерывные раскатные станы, имеющие 5(6) клеток с 3-валковыми калибрами. Две последние клетки – чистовые, определяют окончательное формирование толщины стенки и требуемые условия, необходимые для извлечения раската с оправки станом-извлекателем, имеющим общую ось прокатки с непрерывным раскатным станом.

Однако увеличение количества валков в клети приводит к повышению угла охвата оправки. Увеличение угла охвата оправки при деформации раската в чистовых калибрах негативно сказывается на условиях извлечения раската с оправки станом-извлекателем. С учетом того, что скорость перемещения оправки меньше скорости раската на выходе из очагов деформации чистовых калибров, то в момент касания металлом раската оправки и при заполнении межклетевого промежутка условия захвата металла валками ухудшаются. При этом наличие сопротивления перемещению раската со стороны оправки может привести к образованию разрывов на наружной поверхности. В итоге, все это накладывает определенные ограничения на процесс раскатки в чистовых калибрах и обуславливает необходимость решения оптимизационной задачи.

Степень разработанности темы исследования

Процесс раскатки гильзы на ТПА с непрерывным раскатным станом с 3-валковыми клетями и удерживаемой оправкой недостаточно изучен как в России, так и за рубежом. Деформационные, скоростные режимы, а также параметры калибровки валков определяются согласно математическим моделям поставщика оборудования. При этом в большинстве случаев описание формул и зависимостей для определения параметров процесса раскатки имеют различные эмпирические либо поправочные коэффициенты, значения которых определяются либо в процессе горячих испытаний стана, либо на основе уже имеющегося опыта эксплуатации непрерывного раскатного стана.

Значительный теоретический и практический вклад в исследование и развитие процессов продольной прокатки труб внесли отечественные и зарубежные авторы: А. Кальмес, А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин, И.П. Савкин, В.В. Швейкин, Г.И. Гуляев, Ф.А. Данилов, Ю.М. Матвеев, В.Н. Данченко, А.В. Чус, Ю.И. Блинов, А.В. Выдрин, М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт и др. Данные исследования проводились для станков с 2-валковыми клетями, которые по своей конструкции и методам проектирования прокатного инструмента отличаются от станков с 3-валковыми клетями. Это не позволяет в полном объеме перенять накопленный опыт для изучения и совершенствования технологии раскатки гильз с использованием непрерывных раскатных станков с 3-валковыми клетями. Кроме того, большинство работ по проектированию калибровки валков как для 2-х, так и 3-валковых калибров базируются, как правило, на общеизвестных принципах построения. Данные принципы не учитывают граничные условия процесса прокатки:

- позволяющие оптимизировать технологию процесса прокатки с точки зрения повышения точности труб по толщине стенки;
- обеспечивающие безаварийное протекание процесса с учётом извлечения раската с оправки станом-извлекателем.

Целью работы является повышение точности труб по толщине стенки и обеспечение стабильного протекания процесса раскатки.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

- проведен анализ технологий и особенностей раскатки полых заготовок на непрерывных раскатных станах продольной прокатки на основе обзора научно-технической информации;
- определены факторы, влияющие на точность геометрических размеров труб;
- разработана методика определения оптимальных значений этих факторов, обеспечивающих максимальную точность толщины стенки труб;
- разработана компьютерная модель расчета оптимальных геометрических параметров чистовых калибров;
- проведены лабораторные исследования с целью проверки результатов расчета по разработанной методике;
- проведены опытно-промышленные исследования с целью проверки результатов работы;
- разработаны новые технические решения, способствующие повышению точности по толщине стенки и качества наружной поверхности раскатываемых труб, а также снижению риска возникновения аварийных ситуаций.

Научная новизна работы

1. С учетом ограничений процесса прокатки определено оптимальное сочетание величины овальности калибров чистовых клетей, способствующих получению труб с минимальным доверительным интервалом изменения толщины стенки.

2. Разработана научно обоснованная и экспериментально подтвержденная система ограничений, накладываемых на управляющие параметры процесса прокатки в чистовых калибрах.

3. Определена предельная величина овальности 3-валковых калибров чистовых клетей, при которой раскат деформируется без разрушения материала.

4. Численно определена условная граница коэффициента вытяжки, при котором деформация раската осуществляется без изменения толщины стенки в выпуске 3-валкового чистового калибра.

5. Получена аналитическая зависимость для расчёта угла охвата оправки, учитывающая величину овальности калибра и параметры процесса прокатки.

6. Впервые проведено ранжирование стадий осуществления захвата металла валками в чистовых калибрах, выявлены наиболее значимые факторы их определяющие.

7. Определена взаимосвязь между скоростью удержания оправки и условиями захвата металла валками в чистовых калибрах.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработан программный комплекс «Ovality2⁺», имеющий двухмодульную структуру. Программный модуль «Оптимизация» позволяет оперативно определять оптимальное сочетание величин овальности чистовых калибров с учетом параметров системы ограничений процесса, обеспечивающих раскатку труб с повышенной точностью. Программный модуль «База данных» позволяет идентифицировать характеристики требуемого раскатного стана.

Разработан и всесторонне исследован технологический инструмент, обеспечивающий на ТПА с непрерывным раскатным станом получение труб с повышенной точностью.

Разработан и всесторонне исследован технологический инструмент, обеспечивающий на ТПА с непрерывным раскатным станом с 3-валковыми клетями повышение качества передельных труб за счёт снижения поперечной разнотолщинности и уменьшения угла охвата оправки металлом раската, а также способствующий снижению риска возникновения аварийных ситуаций при извлечении раската с оправки станом-извлекателем.

Результаты диссертационной работы:

1. Реализованы в виде рекомендаций и методики расчета оптимальной калибровки валков чистовых 3-валковых клетей непрерывного раскатного стана, внедрены и применяются в повседневной работе специалистами ПАО «СТЗ».

2. Реализованы и внедрены при проектировании новой системы калибров ТПА со станом FQM ПАО «СТЗ».

3. Реализованы и внедрены в учебный процесс при профессиональной переподготовке специалистов АО «ВТЗ» в 2015 г. по программе «Обработка металлов давлением» специализации «Трубное производство», разработанной Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

4. Реализованы и внедрены в учебный процесс в виде Учебного пособия «Математическое моделирование сложных систем в металлургии», предназначенного для практических занятий и самостоятельной работы студентов направлений подготовки бакалавров 22.03.02 «Металлургия», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» и магистров 22.04.02 «Металлургия»

магистерская программа «Обработка металлов давлением» «Южно-Уральского государственного университета» (национальный исследовательский университет).

Методы исследований и достоверность полученных результатов

Для определения оптимальных параметров процесса прокатки труб использован аппарат математического программирования, в частности, разработка алгоритма оптимизации реализована с использованием метода Бокса-Уилсона. Математические модели системы ограничений получены на основе уравнений равновесия продольных сил, действующих на раскат в очаге деформации. Для определения формы поперечного сечения раската в зависимости от управляющих параметров процесса использован программный комплекс Deform-3D, основанный на методе конечный элементов. Для определения зависимостей характера формоизменения раската, а также определения достоверности результатов, полученных с использованием Deform-3D, проведено физическое моделирование в условиях ОАО «РосНИТИ» на лабораторном прокатном стане, имеющем клеть с 3-валковым калибром, проведены исследования в промышленных условиях. Построение геометрических моделей, а также анализ формоизменения раската осуществлен с использованием САД-системы твердотельного моделирования Компас-3D.

Реализация программного продукта осуществлена на основе языка программирования Delphi, интегрированного в платформе Embarcadero RAD Studio XE7. Результаты расчета по разработанной методике имеют высокую сходимость с данными опытно-промышленного исследования в условиях ТПЦ-1 ПАО «СТЗ».

Апробация работы

Основные результаты исследования опубликованы в ряде научно-технических изданий и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе международных: XXI Международная научно-практическая конференция «Трубы-2014. Трубная промышленность России. Вектор инноваций», г. Челябинск, 2014 г.; 11-я Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии», г. Санкт-Петербург, 2015 г.; 67-я (2015 г.), 68-я (2016 г.) и 69-я (2017 г.) научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, студентов и аспирантов Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск; 7-я научная конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск, 2015 г.; Международная научно-практическая конференция «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, 2015 г.; Молодежная научно-практическая конференция «Молодые инноваторы металлургии» (МИМ-2016 и МИМ-2017), ТМК-РосНИТИ совместно с ТМК-Сколково, г. Челябинск; XXII Международная научно-практическая конференция «Трубы-2016. Инновации и импортозамещение в трубной промышленности», г. Челябинск, 2016 г.; XII Молодежная научно-практическая конференция ТМК «Горизонты», г. Сочи, 2016 г.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 8 печатных работах, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 из которых входят в

перечень международного цитирования Web of Science и Scopus, зарегистрированы 2 евразийские и 1 международная заявки на изобретения, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, выпущено 1 учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, изложена на 166 страницах машинописного текста, включающего 63 рисунка, 16 таблиц, список использованных источников из 152 наименований отечественных и зарубежных авторов, 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и освещена степень разработанности тематики исследования, сформулированы цель работы и задачи исследования, перечислены полученные автором результаты, раскрыта их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлены особенности технологии и оборудования непрерывных раскатных станов продольной прокатки. Отмечены основные преимущества и недостатки процесса прокатки полых заготовок с использованием раскатного стана продольной прокатки с 2-х и 3-валковыми клетями. Особое внимание уделено зарубежному опыту эксплуатации современных непрерывных раскатных станов с 3-валковыми клетями. Проведено исследование влияния калибровки валков и параметров процесса раскатки на качество труб. Рассмотрены основные виды калибров, а также принципы построения калибровки валков и режимов обжатий в чистовых клетях стана. Рассмотрены теоретические основы процесса непрерывной продольной прокатки труб.

На основании обзора научно-технической информации установлено:

– современный уровень развития технологии и оборудования для раскатки полых заготовок (гильз), как в России, так и за рубежом базируется на применении непрерывных раскатных станов типа PQF и FQM с 3-валковыми клетями и удерживаемой оправкой;

– процесс раскатки в чистовых калибрах является одним из определяющих с точки зрения окончательного формирования толщины стенки трубы, который в значительной мере определяет характер распределения продольной и поперечной разнотолщинности и состояние поверхности на готовых трубах;

– форма чистовых калибров, имеющих идентичную калибровку валков, и режим работы оправки оказывают существенное влияние, как на характер распределения толщины стенки по периметру трубы, так и на напряженное состояние металла трубы;

– неблагоприятная схема напряжений на локальных участках раската, соответствующих выпускам калибра, может приводить к появлению и развитию дефектов в виде разрывов;

– одним из определяющих параметров калибровки валков чистовых калибров, обеспечивающих минимальную разнотолщинность стенки в поперечном сечении раската, является величина овальности калибра;

– овальность калибра выбирается, как правило, из диапазона, полученного на основе имеющегося опыта эксплуатации непрерывных станов, при этом не учитываются ограничения процесса раскатки;

– существующие методики расчёта калибровки валков 3-валковых калибров имеют методологические неточности, в частности, не учитывается величина утонения стенки раската по выпуску калибра;

– раскат на выходе из непрерывного раскатного стана охватывает оправку с определенным углом, величина которого определяется параметрами калибровки валков, в частности овальностью калибра и параметрами процесса прокатки в чистовых калибрах, при этом величина овальности калибра, с точки зрения угла охвата оправки, не регламентируется, а определяется исключительно на основе опыта эксплуатации.

Во второй главе представлены теоретические исследования и оптимизация процесса прокатки труб в чистовых клетях с 3-валковыми калибрами. Приведена постановка задачи оптимизации, определен критерий оптимизации и управляющие параметры процесса. Сформулирована система ограничений на управляющие параметры. Разработан алгоритм оптимизации и методика расчета параметров прокатного инструмента. Определено оптимальное сочетание величин овальности чистовых калибров.

В качестве *критерия оптимизации*, характеризующего точность раската на выходе из последней клетки стана, выбран доверительный интервал (D) изменения толщины стенки:

$$D = \sigma \cdot k_s, \quad (1)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение толщины стенки трубы;

k_s – коэффициент Стьюдента.

В качестве *управляющих параметров* процесса прокатки выбраны величины овальности калибров последней (Θ_i) и предпоследней (Θ_{i-1}) клетки непрерывного раскатного стана.

Целевая функция, которую необходимо минимизировать, в общем виде определена выражением:

$$D = D(\Theta_{i-1}, \Theta_i). \quad (2)$$

При разработке *системы ограничений* сформулированы основные принципы, лимитирующие диапазон варьирования величины овальности в чистовых калибрах непрерывного раскатного стана, в частности:

– при заполнении стана оправка препятствует проталкиванию трубы через межклетевой промежуток, и, чем больше угол охвата оправки, тем это препятствие больше. В пределе труба может просто остановиться, если это толстостенная труба или собираться в гармошку, если это тонкостенная труба;

– при установившемся процессе прокатки возможны случаи образования поперечных разрывов и подрезов, образующихся в выпусках калибра;

– при освобождении стана могут возникнуть проблемы стягивания трубы с оправки станом-извлекателем.

Процесс деформации в чистовых калибрах рассмотрен в соответствии с пятью стадиями, приведенными на рисунке 1.

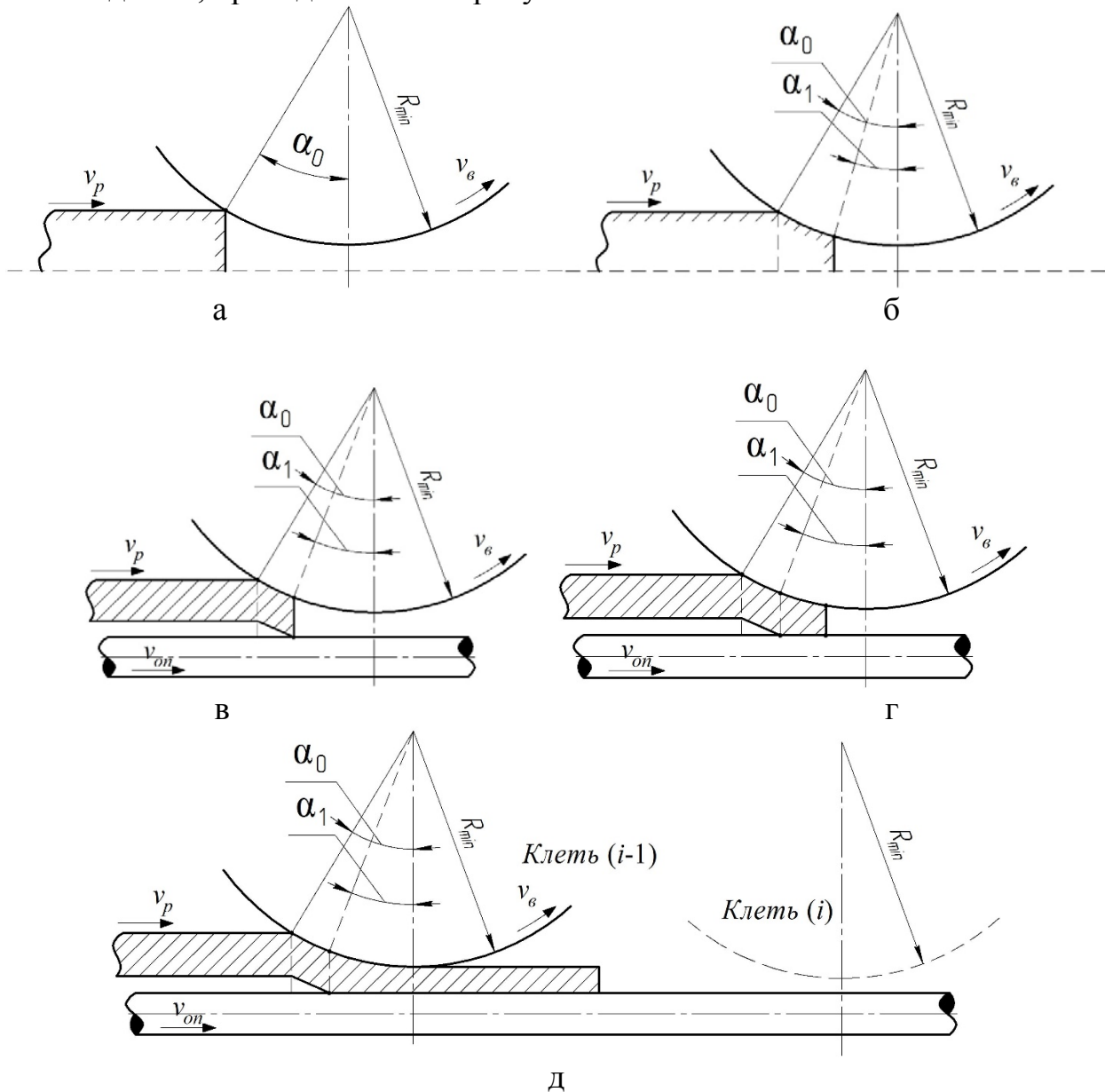


Рисунок 1 – Стадии осуществления процесса деформации в чистовых калибрах:
 а) касание валков – первичный захват; б) заполнение очага деформации при редуцировании диаметра; в) касание оправки – вторичный захват; г) заполнение очага деформации при обжатии толщины стенки раската; д) заполнение межклетевого промежутка

Определяющей, с точки зрения стабильного протекания процесса прокатки является стадия:

- первичного захвата металла валками, учитывающая форму переднего конца раската на входе в очаг деформации чистового калибра;
- вторичного захвата металла валками, учитывающая отрицательное воздействие со стороны оправки непрерывного стана на раскат;
- заполнения межклетевого промежутка, учитывающая предельный угол охвата оправки на выходе раската из очага деформации чистового калибра.

заполнения межклетевого промежутка металлом определены на основании расчета площади контактной поверхности (рисунок 3) раската с валком и раската с оправкой.

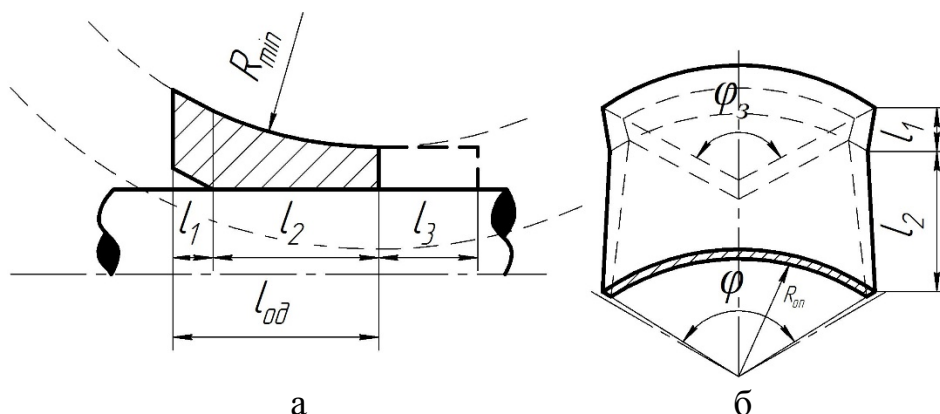


Рисунок 3 – К определению площади контактной поверхности в сечениях очага деформации: а – продольном; б – поперечном

Ограничение по условию заполнения межклетевого промежутка металлом определено в виде неравенства:

$$g_3(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = f_1 - \operatorname{tg} \left[\arccos \left[1 - \frac{S_{\text{вып}(i-1)} - S_{\text{верш}(i)}}{R_{\min}} \right] \right] - k_2 \cdot f_2 \cdot \frac{R_{\text{он}} \varphi}{2R_{\min} \alpha_1 R_k \varphi_3} \cdot [l_2 + l_3] \geq 0, \quad (5)$$

где φ – угол охвата оправки в момент выхода из очага деформации;

l_1 – длина зоны редуцирования по диаметру;

l_2 – длина зоны обжатия по стенке;

l_3 – длина раската на выходе из очага деформации;

R_k – радиус калибра.

Минимально допустимая величина овальности в чистовых калибрах, с точки зрения формирования поперечных разрывов, образующихся в выпусках калибра, определена на основании экспериментальных исследований (рисунок 4).

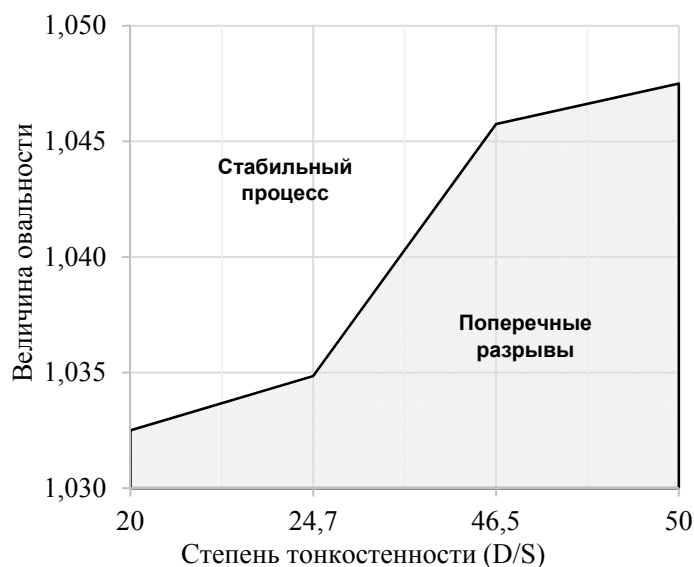


Рисунок 4 – Формирование поперечных разрывов в зависимости от овальности чистовых калибров и тонкостенности раскатываемых труб

В основу решения оптимизационной задачи положен метод Бокса-Уилсона. Алгоритм расчета оптимальной величины овальности чистовых калибров реализован в следующей последовательности:

1. В двумерном фазовом пространстве $\Theta_{i-1}\Theta_i$ задается точка начального приближения:

$$D^{(0,0)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)}; \Theta_i^{(0,0)}). \quad (6)$$

2. В точке начального приближения $D^{(0,0)}$ вычисляется значение критерия оптимизации.

3. Определяются значения критерия оптимизации в окрестностях точки начального приближения с шагом варьирования 0,01:

$$\begin{cases} D^{(0,1)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} - 0,01; \Theta_i^{(0,0)} - 0,01); \\ D^{(0,2)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} + 0,01; \Theta_i^{(0,0)} - 0,01); \\ D^{(0,3)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} - 0,01; \Theta_i^{(0,0)} + 0,01); \\ D^{(0,4)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} + 0,01; \Theta_i^{(0,0)} + 0,01). \end{cases} \quad (7)$$

4. Значение критерия оптимизации проверяется на удовлетворение требований параметров системы ограничений процесса в каждой точке.

5. Составляется матрица планирования полного факторного эксперимента (таблица 1), где общее число опытов (N) определяется формулой:

$$N = m^k = 2^2 = 4, \quad (8)$$

где m – число уровней факторов;

k – число факторов.

Таблица 1 – План эксперимента

| № опыта | Факторы, их взаимодействие и условное обозначение | | | | | | Значение критерия оптимизации |
|---------|---|---------------------------|------------------------|-------------------------|---|---|-------------------------------|
| | Θ_{i-1} | Θ_i | $\Theta_{i-1}\Theta_i$ | | | | |
| 1 | – | $\Theta_{i-1\text{мин}}$ | – | $\Theta_{i\text{мин}}$ | + | $\Theta_{i-1\text{макс}} \cdot \Theta_{i\text{макс}}$ | $D^{(0,1)}$ |
| 2 | + | $\Theta_{i-1\text{макс}}$ | – | $\Theta_{i\text{мин}}$ | – | $\Theta_{i-1\text{мин}} \cdot \Theta_{i\text{мин}}$ | $D^{(0,2)}$ |
| 3 | – | $\Theta_{i-1\text{мин}}$ | + | $\Theta_{i\text{макс}}$ | – | $\Theta_{i-1\text{мин}} \cdot \Theta_{i\text{мин}}$ | $D^{(0,3)}$ |
| 4 | + | $\Theta_{i-1\text{макс}}$ | + | $\Theta_{i\text{макс}}$ | + | $\Theta_{i-1\text{макс}} \cdot \Theta_{i\text{макс}}$ | $D^{(0,4)}$ |

6. По полученным данным строится линейное уравнение регрессии, коэффициенты которого являются компонентами вектора градиента функции $D^{(0,0)}$ в окрестности точки начального приближения:

$$D = a_0 + a_1\Theta_{i-1} + a_2\Theta_i + a_{12}\Theta_{i-1}\Theta_i. \quad (9)$$

7. Осуществляется снижение величины овальности калибра предпоследней клетки ($i-1$) с шагом 0,02. Снижение величины овальности калибра для последней

клетки (i) пересчитывается по уравнению, обеспечивающему изменение управляющих параметров в направлении вектора градиента ($grad D$):

$$\Delta\Theta_i = \frac{\Delta\Theta_{i-1} \cdot a_2}{a_1}, \quad (10)$$

где a_1 и a_2 – коэффициенты компонента вектора градиента в окрестности точки начального приближения $D^{(0,0)}$.

8. Определяется направление вектора градиента и новая точка:

$$D^{(1,0)}(\Theta_{i-1} - \Delta\Theta_{i-1}; \Theta_i - \Delta\Theta_i). \quad (11)$$

9. Действия по п.п. 2-8 выполняются до тех пор, пока не будет достигнут минимум целевой функции при удовлетворении требований системы ограничений.

10. Величина овальности чистовых калибров принимается оптимальной, если значения критерия оптимизации в окрестностях полученной точки, исследуемых с разным шагом, остается минимальной.

Характер распределения толщины стенки определен на основе результатов компьютерного моделирования в среде Defom-3D. Для этого на выходе переднего конца раската за последнюю клетку стана (рисунок 5а) строился разрез поперечного сечения очага деформации (рисунок 5б) и регистрировалось изображение высокой четкости с целью последующей обработки (рисунок 6).

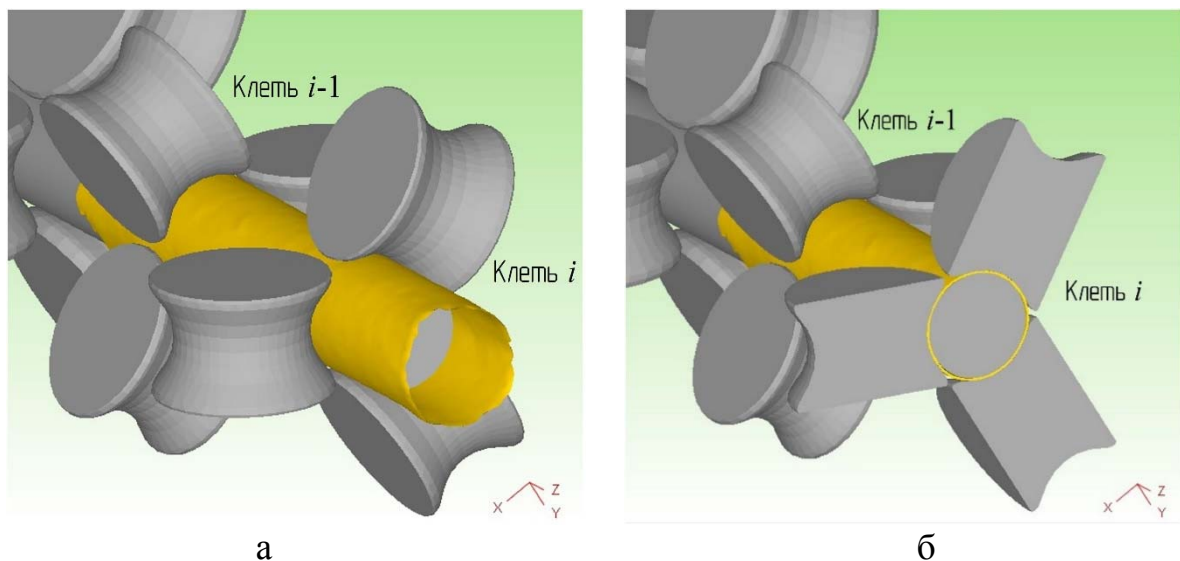


Рисунок 5 – К определению характера распределения толщины стенки раската:
а – выход раската за последнюю клетку стана; б – разрез поперечного сечения очага деформации

Для расчета критерия оптимизации в каждой исследуемой точке фазового пространства, определяемой на основании разработанного алгоритма, толщина стенки измерялась в поперечном сечении раската в 72 точках, ориентированных относительно центра калибра (рисунок 6).

Толщины соответствующих стенок раската усреднялись, например, толщина стенки в вершине калибра усреднялась в точках S1, S25 и S49. При определении

критерия оптимизации коэффициент Стьюдента, для выборки из 72 измерений, рассчитан при доверительной вероятности 95% и соответствует величине 1,994.

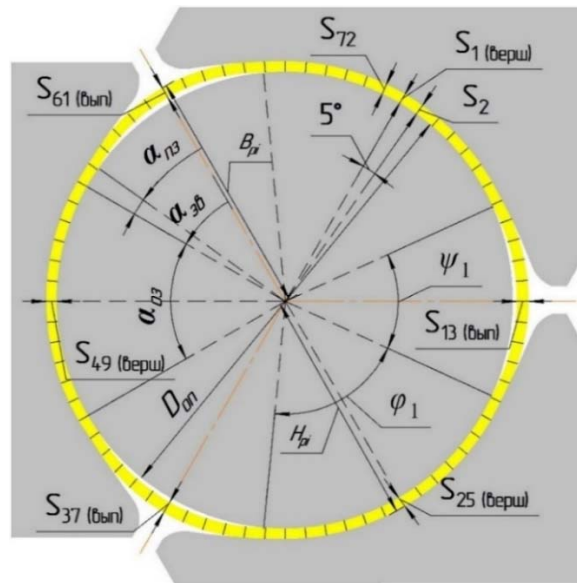


Рисунок 6 – Схема измерений геометрических параметров в поперечном сечении раската с использованием Компас-2D

Последовательное решение оптимизационной задачи, в соответствии с разработанным алгоритмом и системой ограничений, позволило на пятом шаге оптимизации определить оптимальную величину овальности чистовых калибров. Результаты перехода точки в двумерном фазовом пространстве и значение критерия оптимизации, в каждой исследуемой точке, представлены на рисунке 7.

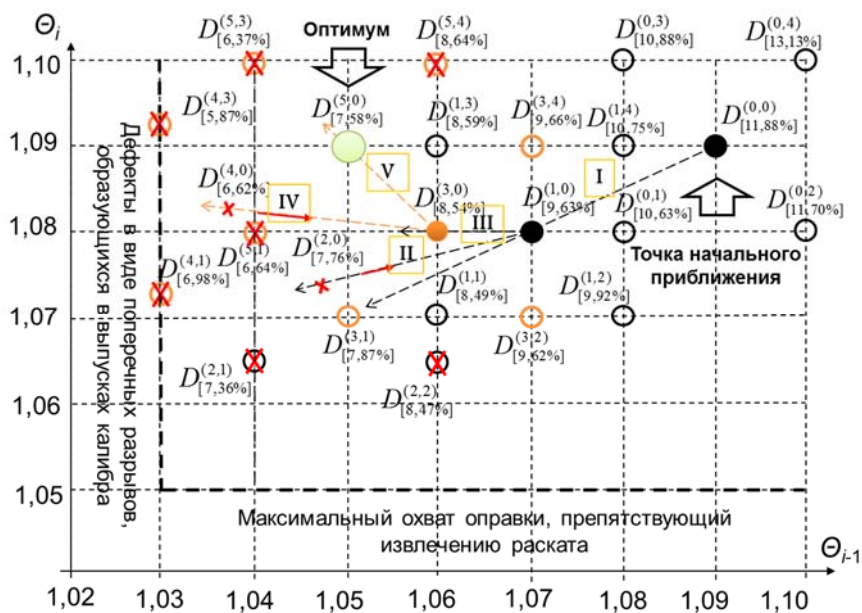


Рисунок 7 – Двухмерное фазовое пространство $\Theta_{i-1}\Theta_i$

В результате установлено, что оптимальным решением, способствующим повышению точности труб по толщине стенки и стабильности протекания процесса прокатки, является выполнение калибра в предпоследней клетке стана с меньшей

величиной овальности, чем в последней клетке. Это достигается благодаря тому, что при прокатке в предпоследнем чистовом калибре с меньшей величиной овальности обеспечивается лучшая проработка толщины стенки в зоне выпуска калибра, а разработанная система ограничений обеспечивает требуемые условия с точки зрения стабильности протекания процесса раскатки и повышения качества поверхности раскатываемых труб. Далее, при деформации в последнем чистовом калибре с большей величиной овальности, обеспечивается необходимый для снятия раската с оправки угол охвата.

В третьей главе представлены результаты лабораторных исследований разработанной методики расчета оптимальной величины овальности чистовых калибров.

Для проверки результатов, полученных при решении оптимизационной задачи, проведено исследование формоизменения раската на основе физического моделирования. Физическое моделирование процесса раскатки полых заготовок на оправке осуществлено в условиях ОАО «РосНИТИ» на лабораторном прокатном стане, имеющем клеть с 3-валковым калибром. В качестве модельного материала образцов, имитирующего прокатку нагретой стали, использован свинец марки С1, который также исключает фактор влияния неравномерного нагрева на результаты эксперимента. В качестве исходных использованы гильзы наружным диаметром 41,2 мм с толщиной стенки 2,6 мм, полученные путем расточки на токарном станке до заданных геометрических параметров. Перед прокаткой, для снижения трения между оправкой и внутренней поверхностью гильзы, на поверхность оправки была нанесена графитовая смазка. Раскатка гильз осуществлена на оправке диаметром 34,8 мм. Измерение толщины стенки осуществлено в 72 точках в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 6. Эксперимент проведен с тройной кратностью повторения опытов для двух систем калибров в следующей последовательности:

- на первом этапе проведена деформация 6 гильз в трех черновых проходах, с целью получения подката для чистовых калибров (рисунок 8);
- на втором этапе проведена деформация подката в чистовых калибрах с равной величиной овальности, соответствующей точке начального приближения (рисунок 9);
- на третьем этапе, оставшиеся 3 подката последовательно раскатаны в чистовых калибрах с оптимальной величиной овальности (рисунок 10).

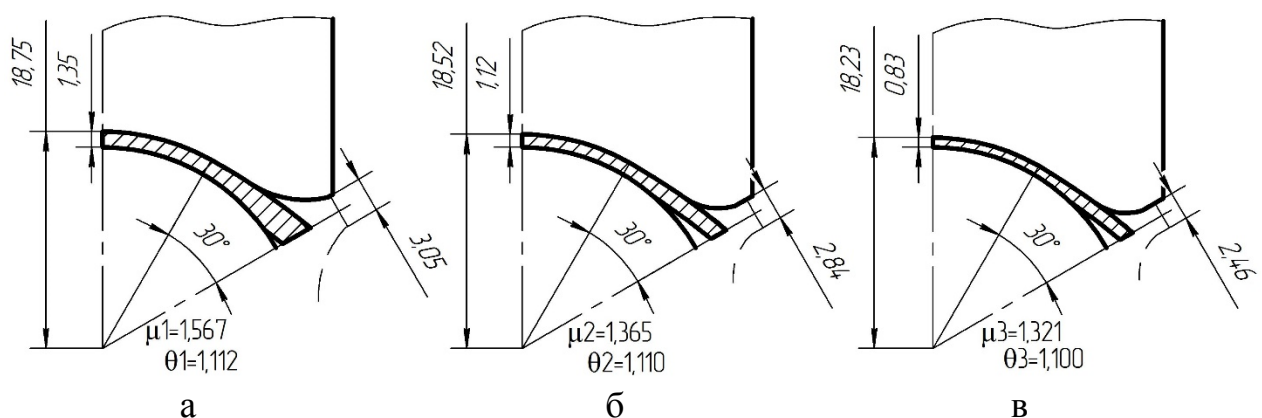


Рисунок 8 – Очаг деформации для 1/6 части калибра в клетке:
а – №1; б – №2; в – №3

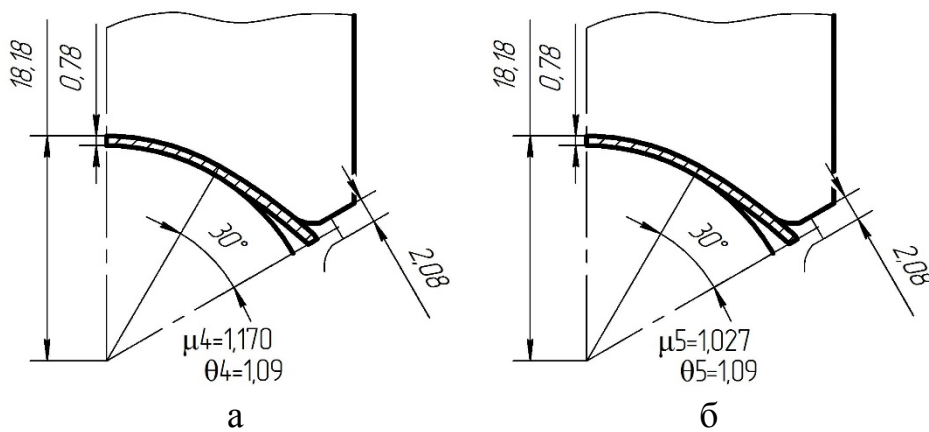


Рисунок 9 – Очаг деформации для 1/6 части калибра с равной величиной овальности в чистовых клетях: а – №4; б – №5

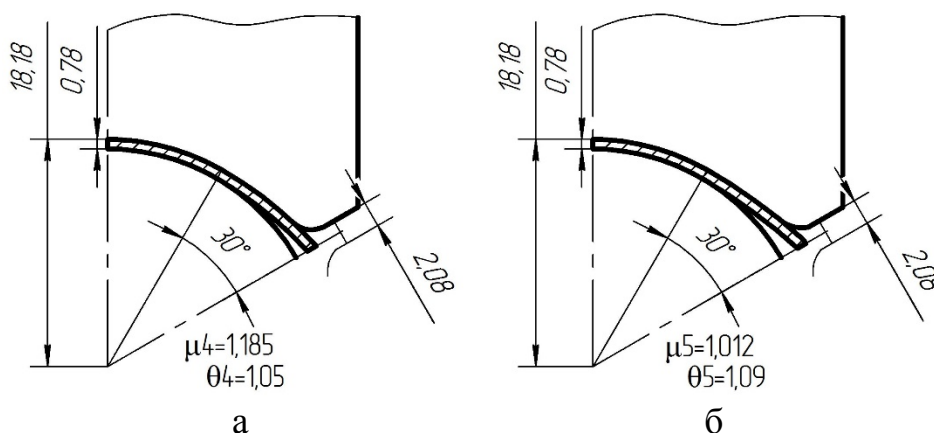


Рисунок 10 – Очаг деформации для 1/6 части калибра с оптимальной величиной овальности в чистовых клетях: а – №4; б – №5

Из анализа результатов, приведенных на рисунке 11, установлено:

– при прокатке в калибрах с равной величиной овальности толщина стенки в зоне отрыва раската от оправки получает некоторое утонение от номинальной толщины. По линии разъема валков стенка утолщается. Следствием данного распределения толщины стенки в выпуске калибра является то, что в зоне отрыва раската от оправки формоизменение металла происходит за счет растягивающих напряжений, возникающих в выпуске калибра, следовательно, чем меньше угол охвата оправки и больше величина продольных растягивающих напряжений, тем больше стенка подвержена изменению;

– прокатка в калибрах с оптимальной величиной овальности сопровождается утонением стенки по линии разъема калибра после каждого прохода на 3,5 и 2,4 % в сравнении с прокаткой в калибрах с равной величиной овальности. Толщина стенки распределяется равномернее. Утонение стенки в местах отрыва раската от оправки менее выраженное. В обоих случаях стенка по линии разъема калибра утолщается относительно номинальной толщины. Прокатка в калибрах с оптимальной величиной овальности способствует уменьшению уширения раската и увеличению угла охвата оправки в предпоследнем чистовом калибре.

Сопоставление результатов характера распределения толщины стенки, полученного при физическом моделировании и решении оптимизационной задачи

для величин овальности чистовых калибров, соответствующих точке начального приближения и оптимальной показало высокую сходимость (рисунок 12). В точке начального приближения погрешность результатов расчета не превышает 2,02 %, в точке с оптимальной величиной овальности 2,2 %. Это, в свою очередь, позволило сделать вывод о корректности результатов, полученных на основе разработанной методики расчета оптимальной величины овальности чистовых калибров.

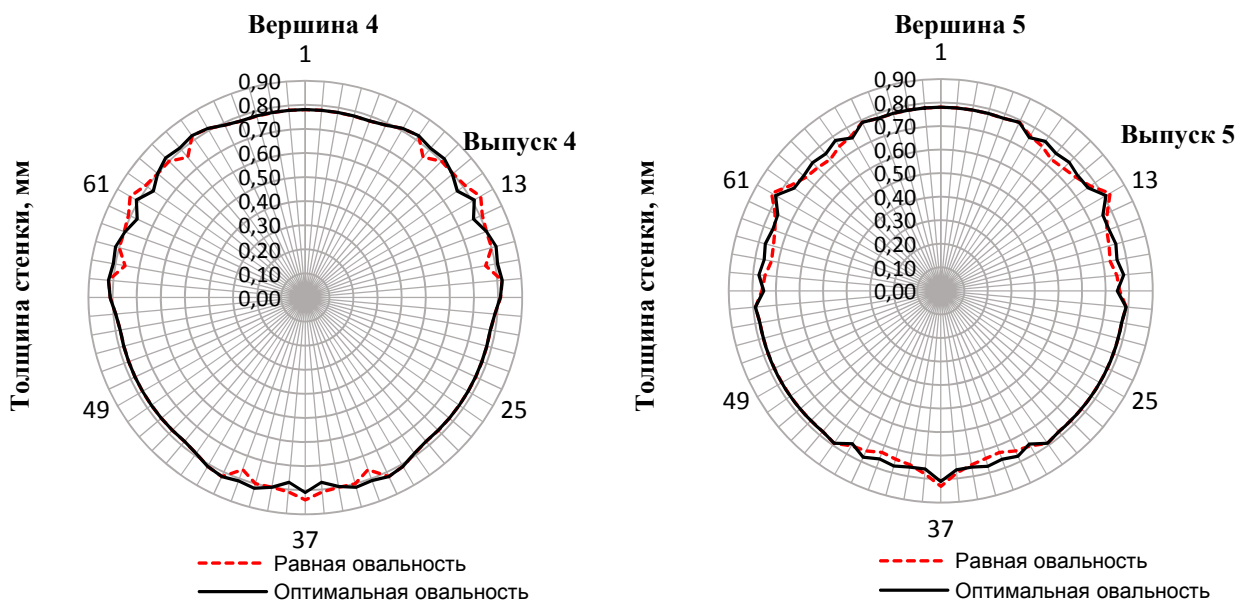


Рисунок 11 – Характер распределения толщины стенки раската в чистой клетке: а – №4; б – №5

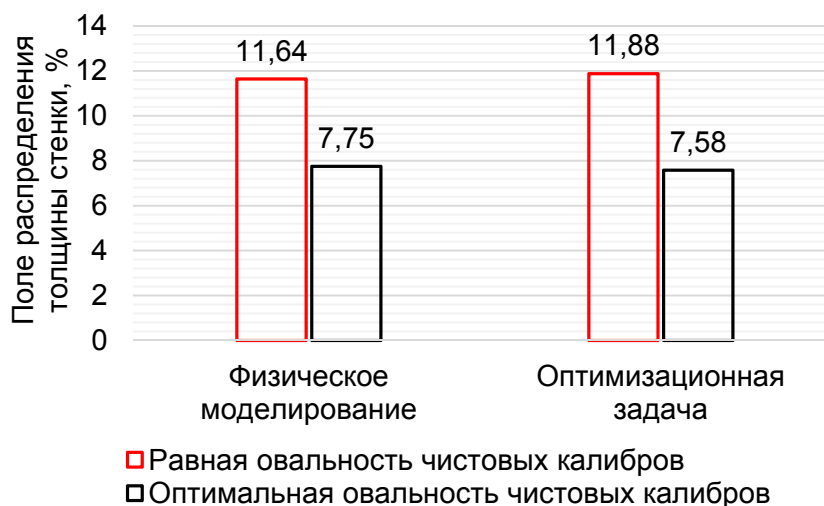


Рисунок 12 – Поле распределения толщины стенки раската

В четвертой главе представлено опытно-промышленное исследование и сопоставление результатов расчета по разработанной методике с промышленными данными; разработан программный продукт и технические решения, направленные на повышение точности горячекатаных бесшовных труб.

Оценка результатов расчёта параметров процесса прокатки, полученных с использованием разработанной методики расчета, проведена в условиях ТПЦ-1 ПАО «СТЗ» в процессе мониторинга технологии изготовления труб наружным

диаметром 325 мм с толщиной стенки 8,0 мм на ТПА со станом FQM с использованием системы калибров 384 мм. При получении труб с использованием данной системы калибров применяется гильза наружным диаметром 433 мм с толщиной стенки 26,9 мм. Калибры чистовых клетей стана FQM имеют идентичную калибровку валков с величиной овальности равной 1,087.

В процессе мониторинга установлено: при извлечении раската с оправки станом-извлекателем и последующем калибровании труб стенка по периметру поперечного сечения раската претерпевает утолщение, характер распределения толщины стенки качественно не изменяется; доли эксцентричной и гранёной составляющей, вносимые соответственно прошивкой непрерывнолитой заготовки и последующей раскаткой на станах продольной прокатки, в общей поперечной разнотолщинности, соизмеримы.

Характер распределения толщины стенки по периметру поперечного сечения раската и угол охвата оправки в зависимости от параметров процесса прокатки и овальности чистовых калибров определен на основе исследования недоката, образованного во всех клетях стана FQM. Измерение толщины стенки и угла охвата оправки осуществлено в соответствии со схемами, приведенными на рисунке 13.

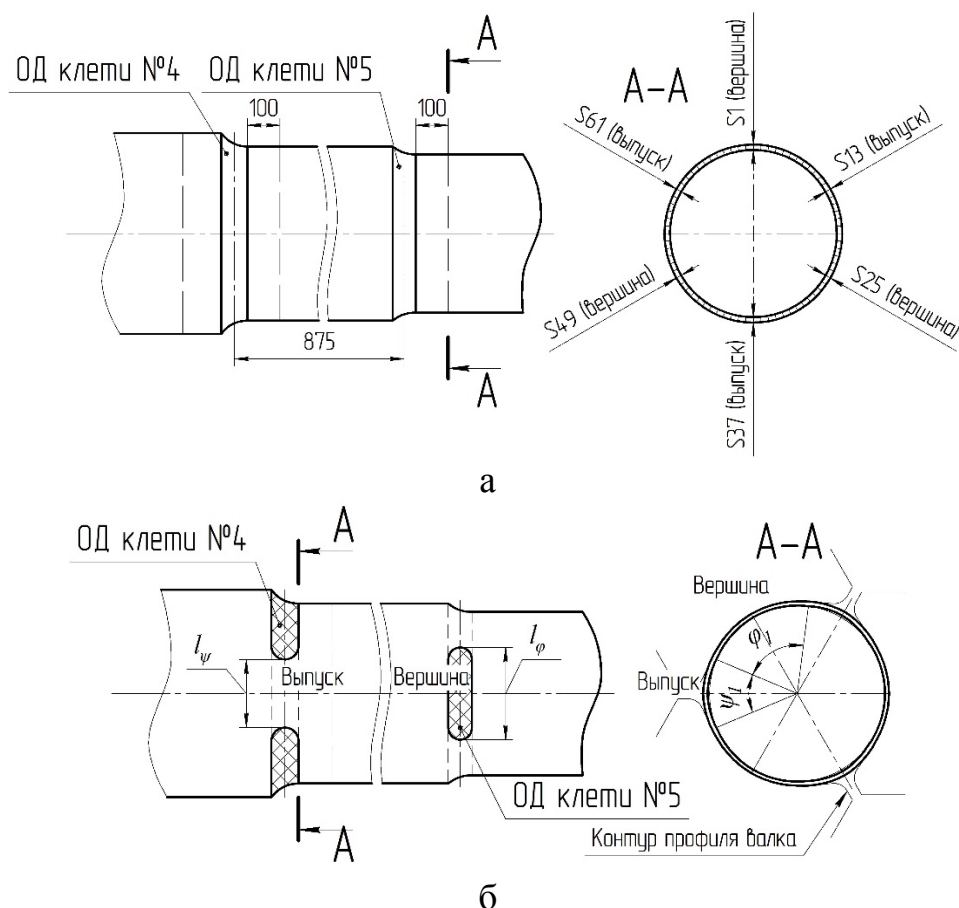


Рисунок 13 – Схема измерения толщины стенки (а) и угла охвата оправки (б):
 φ_1 – угол охвата оправки со стороны одного валка, соответствующий дуге l_φ ;
 ψ_1 – угол отрыва раската от оправки, соответствующий дуге l_ψ

Из анализа результатов установлено, что поперечная разнотолщинность стенки раската, рассчитанная на основе разработанной методики, сопоставляется с

промышленными данными с погрешностью, не превышающей 8,6 %. Угол охвата оправки, в зависимости от овальности чистовых калибров и параметров процесса прокатки, определен с погрешностью, не превышающей 2,0 %.

Результаты проведенного исследования реализованы в виде программного комплекса Ovality2⁺. Программный модуль «Оптимизация» (рисунок 14) позволяет оперативно определять оптимальное сочетание величин овальностей чистовых калибров с учетом параметров системы ограничений процесса, обеспечивающих раскатку труб с повышенной точностью. Система ограничений регламентирует снижение овальности в чистовых калибрах с точки зрения выполнения условий первичного и вторичного захватов металла валками, заполнения очага деформации и межклетевого промежутка с учетом отрицательного воздействия оправки на раскат, а также предельного угла охвата оправки, обеспечивающего прокатку труб без поперечных разрывов и подрезов, и способствующего беспрепятственному извлечению раската с оправки.

The screenshot shows a software window titled "Оптимизация" (Optimization). It contains several tabs and input fields for configuring the optimization process.

Optimization Parameters:

- Стан: FQM
- Система калибров: 384
- Сортанент: 325 x 8,0
- Марка стали: 09Г2С

Conditions for ovality variation in finished calibers:

| | Только в 4 клетки | Только в 5 клетки | Совместное |
|---------------------|-------------------|-------------------|------------|
| Овальность калибра | 1,06 | 1,02 | 1,03 |
| Точность раската, % | 8,67 | 7,45 | 6,73 |

Process constraints (Ограничения процесса раскатки):

| Constraint | 4 cells | 5 cells | Combined |
|-------------------------|-------------------|--|--|
| 1. Охват оправки: | | | |
| 4 клетка | 253,84 > 247,85 + | 253,84 > 246,84 + | 253,84 < 289,28 - |
| 5 клетка | 220,01 > 215,94 + | 220,01 < 252,98 - | 220,01 < 268,99 - |
| 2. Первичный захват: | | | |
| 4 клетка | 0,358 > 0,334 + | 0,358 > 0,253 + | 0,358 > 0,228 + |
| 5 клетка | 0,36 > 0,253 + | 0,36 < 0,424 - | 0,36 < 0,403 - |
| 3. Вторичный захват: | | | |
| 4 клетка | 0,191 > 0,187 + | 0,281 > 0,187 + | 0,31 > 0,187 + |
| 5 клетка | 0,287 > 0,075 + | 0,101 < 0,185 - | 0,123 < 0,185 - |
| 4. Заполнение ОД: | | | |
| 4 клетка | 0,191 > 0,157 + | 0,281 > 0,151 + | 0,31 > 0,284 + |
| 5 клетка | 0,287 > 0,107 + | 0,107 < 0,125 - | 0,123 < 0,126 - |
| 5. Заполнение МКП: | | | |
| 4-5 клетки | 0,191 > 0,048 + | 0,281 > 0,084 + | 0,31 > 0,297 + |
| 6. Дефекты поверхности: | Отсутствуют + | Дефекты в виде подрезов, образующихся в выпусках калибра - | Дефекты в виде поперечных разрывов по телу раската - |

Buttons: "Определить параметры" (Determine parameters) for each column.

Result: "Результат оптимизации: Успешно" (Optimization result: Successful) for the first column, "Не выполняется" (Not performed) for the others.

Footer: "Очистить форму" (Clear form) button and printer/printer with file icons.

Рисунок 14 – Программный модуль «Оптимизация»

На основании разработанной методики расчета оптимальной величины овальности спроектирована новая форма 3-валкового калибра, способствующая снижению угла охвата оправки при сохранении точности труб по толщине стенки. Данный результат был достигнут за счет совершенствования радиусного выпуска калибра, выполнение которого осуществляется дугами регламентированных углов и радиусов. Первая дуга, сопряженная с обжимной зоной калибра, обеспечивает

требуемый угол отрыва раската от оправки, вторая, выполненная с оптимальным радиусом, обеспечивает проработку толщины стенки раската в выпуске калибра. Техническое решение реализовано при прокатке труб наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 8,0 мм в системе калибров 384 мм стана FQM в 4 клетки (рисунок 15). Величины овальностей калибров 4 и 5 клетки выполнены согласно принципу оптимальности $\Theta_4 < \Theta_5$.

Предварительный анализ технологии прокатки позволил установить, что использование нового калибра способствует:

- снижению угла охвата оправки в 4 клетки на 6,7 % и в 5 клетки на 0,5 %;
- снижению уширения раската на 3,2 %;
- повышению точности труб не менее чем в 1,5 раза.

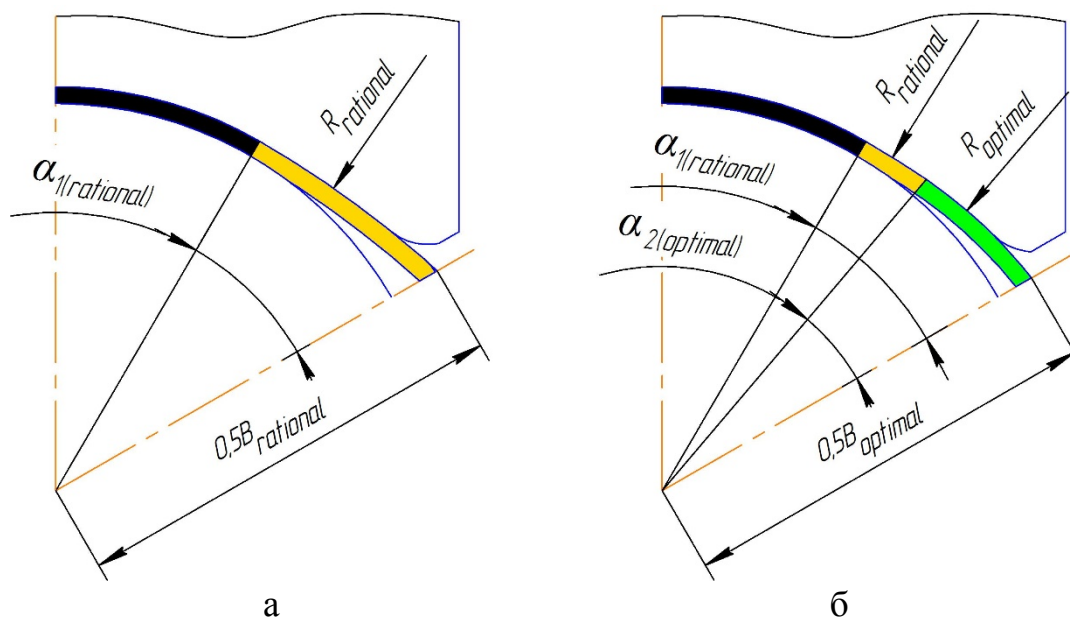


Рисунок 15 – Очаг деформации для 1/6 части калибра при прокатке в:
а – действующем калибре; б – новом калибре

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате выполненной диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Установлена и численно отражена взаимосвязь между величиной овальности чистовых калибров непрерывного раскатного стана с 3-валковыми клетями и точностью готовых труб. Показано, что оптимальным решением, обеспечивающим минимум доверительного интервала изменения толщины стенки раската за непрерывным раскатным станом, является выполнение калибра в предпоследней клетке стана с меньшей величиной овальности, чем в последней клетке.

2. Разработанная математическая модель расчета угла охвата оправки, уширения раската и изменения толщины стенки в выпуске калибра, позволила в

оперативном режиме осуществлять расчет параметров системы ограничений для заданного сортамента раскатываемых труб.

3. Исследована система ограничений процесса прокатки в чистовых калибрах непрерывного раскатного стана с 3-валковыми клетями, позволяющая совершенствовать процесс с точки зрения снижения риска возникновения дефектов в виде поперечных разрывов.

4. Определены условия стабильного протекания процесса раскатки, учитывающие вторичный захват металла валками, условия заполнения очага деформации и межклетевого промежутка металлом с учётом отрицательного воздействия оправки и величины овальности чистовых калибров.

5. Разработаны алгоритм и методика расчета геометрических параметров чистовых калибров непрерывного раскатного стана с 3-валковыми клетями, способствующие оперативному определению оптимальной величины овальности калибров чистовых клетей стана с учетом граничных условий, лимитирующих изменение величины овальности и радиусного выпуска калибра.

6. Сопоставление результатов, полученных с использованием разработанной методики расчета оптимальной величины овальности калибров чистовых клетей, с промышленными данными показало высокую степень сходимости, как с точки зрения определения разнотолщинности стенки раската (погрешность не более 8,6 %), так и разработанных формул для определения системы ограничений (погрешность не более 2,0 %).

7. На основании методики расчета оптимальной величины овальности чистовых калибров разработаны технические решения, способствующие повышению точности раскатываемых труб, обеспечивающие стабильное извлечение раската с оправки, а также способствующие повышению эксплуатационного ресурса оправок раскатного стана.

8. Результаты теоретических исследований, физического и компьютерного моделирования позволяют совершенствовать технологию продольной прокатки труб на ТПА с непрерывным раскатным станом за счет разработанного нового подхода к повышению точности труб по толщине стенки, базирующегося на решении оптимизационной задачи, учитывающего научно обоснованную систему ограничений.

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

1. Черных, И.Н. Определение величины концевой обрезки труб, формирующейся в условиях ТПА с непрерывными станами типа PQF, FQM / И.Н. Черных, Д.О. Струин, Е.А. Шкуратов. – Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Metallургия. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 71–75.

2. Шкуратов, Е.А. Исследование влияния величины овальности чистовых калибров трёхвалкового непрерывного оправочного стана FQM на формоизменение раската / Е.А. Шкуратов, Д.О. Струин, И.Н. Черных, О.Е. Сарафанова, Р.О. Бушин, К.А. Носков, О.А. Панасенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Metallургия. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 139–147.

3. Совершенствование методики определения технологических осей непрерывных станов ТПА 159-426 / Д. В. Лоханов, А. В. Никитин, В. В. Ананян, А.Б. Тюняев, А.В. Никляев, А.Г. Ульянов, Б.В. Баричко, И.Н. Черных, Д. О. Струин, Е.А. Шкуратов // Производство проката. – М, 2016. – №1. – С. 34–38.

4. Шкуратов, Е.А. Влияние величины овальности чистовых клеток раскатного стана на характеристики точности и формоизменение раската / Е.А. Шкуратов, А.В. Выдрин, Д.О. Струин, И.Н. Черных// Металлург. Наука, техника, производство. – 2016. – №1. – С. 75–79.

5. Шкуратов, Е.А. Совершенствование технологии продольной прокатки полых заготовок на непрерывных раскатных станах / Е.А. Шкуратов, А.В. Выдрин // Черные металлы. – 2017. – № 3. – С. 42–46.

Публикации в других изданиях:

6. Выдрин, А.В. Сравнительный анализ процесса оправочной продольной прокатки труб с использованием калибров, образованных разным количеством валков / А.В. Выдрин, И.Н. Черных, Д.О. Струин, Е.А. Шкуратов, Е.В. Храмков // Трубы–2014: труды XXII научно-практической конференции: Ч.2. – С. 143–150.

7. Выдрин, А.В. Теоретические и практические проблемы процесса раскатки гильз на современном непрерывном стане / А.В. Выдрин, Д.О. Струин, И.Н. Черных, Е.А. Шкуратов, М.В. Буняшин. – Санкт-Петербург: Изд-во Политех. ун-та. 2015. С. 72–82.

8. Шкуратов, Е.А. Особенности определения технологической оси непрерывного трубопрокатного стана с трехвалковыми калибрами / Е.А. Шкуратов, Б.Г. Пьянков, Р.О. Бушин, О.А. Панасенко, И.Н. Черных, Б.В. Баричко, Д.О. Струин, А.В. Никитин // Трубы – 2016: Труды XXII Международной научно-технической конференция «Трубы-2016»: Ч.2. – С. 206–210.

Патенты и свидетельства:

1. Евразийская заявка на изобретение №201600602, МПК В 21 В 17/00. Система калибров непрерывного трубопрокатного стана / А.В. Выдрин, Е.А. Шкуратов и др. – №201600602; заявл. 29.08.2016г.

2. Евразийская заявка на изобретение №201600605, МПК В 21 В 17/00. Калибр трехвалкового трубопрокатного стана / Е.А. Шкуратов, А.В. Выдрин и др. – №201600605; заявл. 29.08.2016г.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662544. Ovality2⁺ / Е.А. Шкуратов, А.В. Выдрин – № 2016619907; заяв. 22.09.2016; опубл. 15.11.2016. – 1 с.

Учебно-методические работы

1. Выдрин, А.В. Математическое моделирование сложных систем в металлургии: учебное пособие / А. В. Выдрин, Е. А. Шкуратов, М. А. Соседкова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 76 с.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 11.10.2017. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,16 Уч.-изд. л. 1. Тираж 120 экз. Заказ

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.