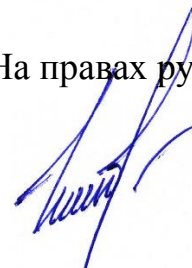


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи



**Шкуратов Евгений Александрович**

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

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

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

Челябинск 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	10
<b>1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАСКАТКИ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК НА НЕПРЕРЫВНЫХ РАСКАТНЫХ СТАНАХ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ .....</b>	<b>18</b>
1.1 Особенности технологии и оборудования непрерывных раскатных станов продольной прокатки .....	18
1.2 Влияние калибровки валков и параметров процесса раскатки на качество передельных труб .....	28
1.3 Теоретические основы процесса непрерывной продольной прокатки труб .....	36
1.4 Выводы и постановка задач исследования .....	41
<b>2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ТРУБ В ЧИСТОВЫХ КЛЕТЯХ С 3-ВАЛКОВЫМИ КАЛИБРАМИ</b>	<b>44</b>
2.1 Постановка задачи оптимизации процесса прокатки труб в чистовых клетях с 3-валковыми калибрами .....	44
2.1.1 Критерий оптимизации и управляющие параметры процесса .....	45
2.1.2 Система ограничений на управляющие параметры процесса .....	46
2.1.2.1 Разработка условий, ограничивающих процесс деформации металла при заполнении стана .....	49
2.1.2.2 Разработка условий, ограничивающих процесс деформации металла при установившемся процессе и освобождении стана .....	60
2.2 Разработка алгоритма оптимизации и методики расчета параметров прокатного инструмента .....	76
2.2.1 Алгоритм расчета критерия оптимизации .....	76
2.2.2 Разработка методологии обработки данных компьютерного моделирования .....	78
2.2.3 Расчет параметров процесса прокатки и системы ограничений .....	89
2.3 Результаты оптимизации .....	99
2.4 Выводы по главе .....	103
<b>3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ТРУБ В ЧИСТОВЫХ КЛЕТЯХ СТАНА .....</b>	<b>104</b>
3.1 Постановка задачи физического моделирования .....	104

3.2 Применяемое оборудование, материалы и инструмент.....	104
3.3 План проведения эксперимента.....	109
3.4 Порядок и схема проведения измерений.....	109
3.5 Результаты экспериментального исследования.....	110
3.6 Выводы по главе.....	115
<b>4 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ.....</b>	<b>116</b>
4.1 Исследование характера формоизменения раската в чистовых 3-валковых калибрах .....	116
4.2 Разработка программного продукта.....	122
4.3 Разработка технических решений, направленных на повышение точности горячекатаных бесшовных труб .....	130
4.3.1 Система калибров непрерывного трубопрокатного стана .....	130
4.3.2 Калибр трубопрокатного стана.....	135
4.4 Выводы по главе.....	143
<b>ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....</b>	<b>145</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>147</b>
Приложение А – Акт внедрения методики расчета оптимальной калибровки валков чистовых клетей трехвалкового непрерывного раскатного стана .....	162
Приложение Б – Акт внедрения результатов диссертационной работы в процесс проектирования новой системы калибров стана FQM.....	163
Приложение В – Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс АО «ВТЗ» .....	164
Приложение Г – Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс ЮУрГУ .....	165
Приложение Д – Модуль для расчета геометрических параметров чистовых калибров на каждом шаге оптимизации .....	166

### Список сокращений и условных обозначений

- ПАО «ТМК» – Публичное Акционерное Общество «Трубная  
Металлургическая Компания»;
- ОАО «РосНИТИ» – Открытое Акционерное Общество «Российский  
научно-исследовательский институт трубной  
промышленности»;
- ПАО «СТЗ» – Публичное Акционерное Общество «Северский  
Трубный Завод»;
- ПАО «ТАГМЕТ» – Публичное Акционерное Общество «Таганрогский  
Металлургический завод»;
- ОАО «БМЗ» – Открытое акционерное общество, Холдинговая  
компания «Белорусский металлургический завод»;
- «SMS Meer» – немецкая компания, образованная в 1872 году, сначала,  
как самостоятельный производитель текстильных и  
паровых машин, позже, как производитель и основной  
поставщик прокатного оборудования. С 2000 года SMS  
Meer входит в структуру SMS group, с главным офисом,  
расположенным в г. Дюссельдорф (Германия).
- «Danieli» – итальянская компания, образованная в 1914 году, как  
разработчик и поставщик основного технологического  
оборудования и установок для  
металлообрабатывающей промышленности, с главным  
офисом, расположенным в г. Буттрио (Италия).
- MPM – Multistand Pipe Mill, непрерывный раскатной стан с  
2-валковыми клетями и удерживаемой оправкой,  
разработанный компанией Innocenti Santeustacchio S.p.A;
- PQF – Premium Quality Finishing, непрерывный раскатной стан  
с 3-валковыми клетями и удерживаемой оправкой,  
разработанный компанией SMS-Meer;

- PQF-ACO – Axial Change Over, конструкция стана PQF, имеющая станину туннельного типа, позволяющая осуществлять перевалку всего комплекта клетей в направлении оси прокатки;
- PQF-LCO – Lateral Change Over, конструкция стана PQF, позволяющая осуществлять замену отдельных клетей в боковом направлении, перпендикулярном оси прокатки;
- PQF-BCO – Bilateral Change Over, конструкция стана PQF, позволяющая осуществлять замену отдельных клетей в направлении, перпендикулярном оси прокатки, как с левой, так и с правой выдачей клетей;
- FQM – Fine Quality Mill, непрерывный раскатной стан с 3-валковыми клетями и удерживаемой оправкой, разработанный компанией Danieli;
- HCCS – Hydraulic Capsule Control System, автоматизированные гидравлические капсулы;
- ТПА – трубопрокатный агрегат;
- $D_u$  – идеальный диаметр валка;
- $D_{\bar{o}}$  – диаметр бочки валка;
- $D_{\text{дв}}$  – диаметр по дну валка;
- $D_k$  – диаметр калибра;
- $D_{\text{ср}}$  – средний диаметр трубы по дну калибра;
- $L$  – ширина валка;
- $H_k$  – половина высоты калибра;
- $B_k$  – половина ширины калибра;
- $W$  – межвалковый зазор;
- $\alpha_{\text{оз}}$  – зона обжатия толщины стенки раската в очаге деформации;
- $\alpha_{\text{нз}}$  – переходная зона раската в очаге деформации;

- $\alpha_{зр}$  – зона редуцирования раската в очаге деформации;  
 $\alpha$  – угол обжимной зоны калибра;  
 $\alpha_1$  – угол выпуска калибра;  
 $\alpha_5$  – угол сопряжения галтели с радиусным выпуском и ребордой валка, образующего калибр;  
 $R_1$  – радиус обжимной зоны калибра;  
 $R_2$  – радиус выпуска калибра;  
 $R_5$  – радиус галтели;  
 $E$  – эксцентриситет радиуса обжимной зоны калибра;  
 $x_{c1}$  – координата центра радиуса обжимной зоны калибра по оси абсцисс;  
 $y_{c1}$  – координата центра радиуса обжимной зоны калибра по оси ординат;  
 $x_{c2}$  – координата центра радиуса выпуска по оси абсцисс;  
 $y_{c2}$  – координата центра радиуса выпуска по оси ординат;  
 $x_{c5}$  – координата центра радиуса галтели по оси абсцисс;  
 $y_{c5}$  – координата центра радиуса галтели по оси ординат;  
 $D_3$  – наружный диаметр полрой заготовки;  
 $S_3$  – толщина стенки заготовки;  
 $D_{nd}$  – наружный диаметр подката;  
 $S_{nd}$  – толщина стенки подката;  
 $D_p$  – наружный диаметр готового раската;  
 $S_p$  – толщина стенки готового раската;  
 $D/S$  – параметр тонкостенности;  
 $D$  – доверительный интервал изменения толщины стенки (критерий оптимизации);  
 $g_i$  – параметр системы ограничений процесса раскатки;  
 $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение толщины стенки в поперечном сечении раската;

- $S_i$  – толщина стенки, измеренная в  $i$ -ом радиальном сечении;
- $\bar{S}$  – среднее значение толщины стенки в поперечном сечении раската;
- $l$  – количество измерений;
- $\Theta_{i-1}$  – величина овальности калибра в предпоследней клетке стана;
- $\Theta_i$  – величина овальности калибра в последней клетке стана;
- $\Theta_n$  – предельная величина овальности калибра;
- $\Delta S/S$  – относительное обжатие толщины стенки;
- $\varphi_1$  – угол охвата оправки со стороны одного валка;
- $\psi_1$  – угол отрыва раската от оправки со стороны двух смежных валков;
- $\varphi$  – угол охвата оправки со стороны трех валков;
- $\varphi_n$  – предельный угол охвата оправки со стороны трех валков;
- $\varphi_3$  – угол охвата оправки со стороны трех валков при вторичном захвате;
- $B_p$  – половина ширины раската;
- $H_p$  – половина высоты раската;
- $\Delta_B$  – уширение раската;
- $S_{\text{верш}}$  – толщина стенки раската в вершине калибра;
- $S_{\text{вып}}$  – толщина стенки раската в выпуске (по линии разъема валков) калибра;
- $\mu$  – коэффициент вытяжки;
- $\Delta_S$  – изменение толщины стенки в выпуске калибра;
- $R_{\text{min}}$  – минимальный радиус валка (радиус по дну валка);
- $R_k$  – радиус калибра;
- $\alpha_{\text{см}}$  – угол смятия;
- $\alpha_0$  – угол первичного захвата;

- $\alpha_1$  – угол вторичного захвата;  
 $v_p$  – линейная скорость раската;  
 $n_в$  – частота вращения валков;  
 $v_{оп}$  – линейная скорость оправки;  
 $(i-1)$  – предпоследняя чистовая клеть;  
 $(i)$  – последняя чистовая клеть;  
 $P$  – сила нормального давления;  
 $P_o$  – осевое усилие со стороны оправки;  
 $T$  – сила трения;  
 $Q$  – вталкивающая сила со стороны предшествующей клетки;  
 $f_1$  – коэффициент трения на контакте раската с валком;  
 $f_2$  – коэффициент трения на контакте раската с оправкой;  
 $\tau$  – напряжение трения;  
 $p_k$  – контактное давление;  
 $F_k$  – площадь контактной поверхности;  
 $F_{кв}$  – площадь контактной поверхности между валком и раскатом;  
 $F_{ко}$  – площадь контактной поверхности между оправкой и раскатом;  
 $l_{од}$  – длина очага деформации;  
 $l_1$  – длина зоны редуцирования;  
 $l_2$  – длина зоны обжатия по стенке;  
 $l_3$  – длина раската на выходе из очага деформации;  
 $k$  – коэффициент, учитывающий площадь контакта раската с оправкой;  
 $k_2$  – коэффициент охвата оправки при вторичном захвате;  
 $k_в$  – количество валков в клетке;  
 $\Delta$  – расстояние от поверхности оправки до внутреннего диаметра раската в выпуске калибра;



$R_{on}$  – радиус оправки;

$l_{\varphi}$  – длина дуги охвата со стороны одного валка;

$l_{\psi}$  – длина дуги отрыва раската от оправки между двумя смежными валками;

$\Delta S_{\%}^{KM}$  – относительная разнотолщинность стенки раската при компьютерном моделировании;

$\Delta S_{\%}^{HO}$  – относительная разнотолщинность стенки недоката при промышленном исследовании;

$\Delta_{расч}$  – погрешность расчетов при сопоставлении результатов исследования.

## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение прибыльности и конкурентоспособности Компании являются основными составляющими с точки зрения успешного развития бизнеса, которые во многом достигаются за счет повышения качества производимой продукции. Это, в свою очередь, формулирует одну из приоритетных и ключевых задач для производителей горячедеформированных бесшовных труб, заключающуюся в создании технологии массового производства продукта, отвечающего уникальным требованиям, предъявляемым к точности геометрических параметров [1-3]. В связи с чем совершенствование технологии прокатки должно быть направлено в первую очередь на поиск технических решений, способствующих повышению точности геометрических параметров готовых труб [4]. В перспективе, это позволит успешно конкурировать в сегменте рынка сварных труб соизмеримого сортамента.

Основной тенденцией мирового развития трубопрокатного производства является применение в линии трубопрокатного агрегата непрерывного раскатного стана продольной прокатки. При производстве бесшовных труб в линии ТПА с непрерывным раскатным станом гильзу раскатывают в передельную трубу, как правило, не более трех наружных диаметров с требуемой толщиной стенки. Окончательное формирование толщины стенки и наружного диаметра, с целью расширения производимого сортаментного ряда труб, осуществляется на редуционно-растяжных и калибровочных станах. При этом формирование толщины стенки в непрерывном раскатном стане в значительной мере определяет характер распределения продольной и поперечной разнотолщинности и состояние поверхности на готовых трубах.

Форма калибра оказывает существенное влияние как на характер распределение толщины стенки, так и напряженно-деформированное состояние металла раската. 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 по периметру поперечного сечения раската достигается за счет увеличения количества валков в клетки, образующих калибр, поэтому в последнее

время все большее применение находят непрерывные раскатные станы с 3-валковыми калибрами типа PQF и FQM.

Однако, с другой стороны, 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 в чистовых калибрах меньше скорости раската, то в момент касания 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.

Следует отметить, что 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 определяют, либо в процессе горячих испытаний стана, либо на основе уже имеющегося опыта эксплуатации непрерывными раскатными станами.

Значительный теоретический и практический вклад в исследование и развитие процессов продольной прокатки труб внесли как отечественные, так и зарубежные авторы: 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, А. Кальмес и др. Однако данные исследования проводились для станом с 2-валковыми клетями, которые по своей конструкции и методам проектирования прокатного инструмента отличаются от станом с 3-валковыми клетями. В свою очередь это не позволяет в полном объеме

перенять накопленный опыт для изучения и совершенствования технологии раскатки гильз с использованием раскатных станов с 3-валковыми клетями. Кроме того, большинство работ по проектированию калибровки валков непрерывных раскатных станов как для 2-х, так и 3-валковых калибров базируются, как правило, на общеизвестных принципах построения. Данные принципы не учитывают характер формоизменения раската и граничных условий, способствующих повышению точности труб, стабильному безаварийному протеканию процесса раскатки и извлечению раската с оправки станом-извлекателем, которые, в свою очередь, во многом определяются условиями деформирования в чистовых калибрах раскатного стана.

Таким образом, исследование технологии продольной прокатки на непрерывных раскатных станах с 3-валковыми клетями и её совершенствование за счет разработки нового подхода к повышению точности труб по толщине стенки, базирующегося на решении оптимизационной задачи с учетом научно обоснованной системы ограничений на управляющие параметры процесса раскатки являются *актуальными* в настоящее время.

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

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

- провести анализ технологий и особенностей раскатки полых заготовок на непрерывных раскатных станах продольной прокатки на основе обзора научно-технической информации;
- определить факторы, влияющие на точность геометрических размеров труб;
- разработать методику определения оптимальных значений этих факторов, обеспечивающих максимальную точность толщины стенки труб;
- разработать компьютерную модель расчета оптимальных геометрических параметров чистовых калибров;

- провести лабораторные исследования с целью проверки результатов расчета по разработанной методике;
- провести опытно-промышленные исследования с целью проверки результатов работы;
- разработать 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.* В результате теоретического и экспериментального исследования технологии продольной прокатки труб с использованием непрерывных раскатных станков с 3-валковыми клетями:

- определено оптимальное сочетание величины овальности калибров чистовых клетей с учетом ограничений параметров процесса прокатки, способствующих получению труб с минимальным доверительным интервалом изменения толщины стенки;
- разработана научно обоснованная и экспериментально подтвержденная система ограничений параметров процесса прокатки в чистовых калибрах;
- определена предельная величина овальности калибров чистовых клетей, при которой раскат деформируется без разрушения материала;
- численно определена условная граница коэффициента вытяжки, при котором деформация раската осуществляется без изменения толщины стенки в выпуске чистового калибра;
- получена аналитическая зависимость для расчёта угла охвата оправки в зависимости от величины овальности калибра и параметров процесса прокатки;
- впервые проведено ранжирование стадий осуществления захвата металла валками в чистовых калибрах и выявлены наиболее значимые факторы их определяющие;
- 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 соотношение форм чистовых калибров с учетом параметров системы ограничений процесса, обеспечивающих раскатку труб с повышенной точностью. Система ограничений регламентирует снижение овальности в чистовых калибрах при заполнении стана, установившемся процессе и в процессе освобождения стана от металла раската с учетом выполнения условий первичного, вторичного захватов металла валками и при заполнении межклетевого промежутка с учетом отрицательного воздействия оправки на раскат. Также, в зависимости от заданной величины овальности чистовых калибров, предусмотрена возможность определения дефектов поверхности прокатного происхождения. Кроме того, для заданных параметров процесса прокатки, удовлетворяющих требованию системы ограничений, в программе предусмотрено построение калибровки валков чистовых клетей стана. Программный модуль «База данных» позволяет идентифицировать характеристики требуемого раскатного стана. (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662544 от 15.11.2016 г.).

Разработан и всесторонне исследован технологический инструмент, обеспечивающий на ТПА с непрерывным раскатным станом получение труб с повышенной точностью (Евразийская заявка зарегистрирована под № 201600602 от 29.08.2016 г.).

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, способствующего снижению риска возникновения аварийных ситуаций при извлечении раската станом-извлекателем (Евразийская заявка зарегистрирована под № 201600605 от 29.08.2016 г.).

Разработан и всесторонне исследован способ производства труб и оправочный узел для его осуществления, обеспечивающий повышение эксплуатационного ресурса оправки при раскатке передельных труб в непрерывном раскатном стане, за счет увеличения количества прокатанных труб на одной оправке, улучшение качества поверхности труб и исключение аварийных ситуаций в процессе прокатки. (Международная заявка зарегистрирована под № PCT/RU2017/000296 от 10.05.2017 г.).

Результаты диссертационной работы:

- реализованы в виде рекомендаций и Методики расчета оптимальной калибровки валков чистовых клетей непрерывного раскатного стана с 3-валковыми клетями, внедрены и применяются в повседневной работе специалистами ПАО «СТЗ» (Приложение А).

- реализованы и внедрены при проектировании новой системы калибров ТПА со станом FQM ПАО «СТЗ» (Приложение Б).

- 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» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)) (Приложение В).

- 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» (НИУ) (Приложение Г).

*Апробация работы.* Основные результаты исследования опубликованы в ряде научно-технических изданий, рекомендованных перечнем ВАК и входящих в перечень международного цитирования Web of Science и Scopus, а также

обсуждались на конференциях различного уровня: 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, 2015г.; 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.

Работа выполнена на кафедре «Процессы и машины обработки металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения 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»).

*Положения, выносимые на защиту:* результаты исследования технологии продольной прокатки на ТПА с непрерывным раскатным станом с 3-валковыми клетями; экспериментальные исследования влияния величины овальности чистовых калибров на геометрические параметры раската и дефекты поверхности прокатного происхождения для различных соотношений D/S раскатываемых труб; научно обоснованная система ограничений процесса прокатки труб в чистовых калибрах; ранжирование стадий осуществления захвата металла валками в



чистовых калибрах; методика расчета оптимальной величины овальности калибров чистовых клетей с учетом ограничений параметров процесса прокатки, обеспечивающей получение труб с минимальной разнотолщиной стенки и исключающей появление дефектов поверхности при раскатке; экспериментальное исследование оптимальной калибровки валков чистовых 3-валковых клетей непрерывного раскатного стана; опытно-промышленное исследование и сопоставление результатов, полученных с использованием разработанной методики расчета оптимальной величины овальности чистовых калибров с промышленными данными; технические решения, способствующие повышению точности по толщине стенки и качеству наружной поверхности раскатываемых труб, а также снижению рисков возникновения аварийных ситуаций.

Экспериментальные исследования процесса продольной прокатки труб проводились в условиях ОАО «РосНИТИ» на лабораторном прокатном стане, имеющем клеть с 3-х валковым калибром. Опытно-промышленное сопоставление результатов работы осуществлялось в условиях ПАО «СТЗ» на ТПА с непрерывным раскатным станом FQM.

# **1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАСКАТКИ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК НА НЕПРЕРЫВНЫХ РАСКАТНЫХ СТАНАХ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ**

Технология изготовления толстостенной гильзы, разработанная Максом и Рейнхардтом Маннесманнами (1885 г.), и технология раскатки гильз на агрегате с пилигримовым станом (1890 г.) послужили толчком к началу бурного развития трубного производства и созданию новых способов получения бесшовных труб [5]. В начале XX века появляются автоматические, реечные и непрерывные станы, создание которых связано с именами Р.Ч. Штифеля, Ч. Келлога, А. Фасля [6-8].

Современный уровень развития производства бесшовных труб, как в России, так и за рубежом характеризуется большим разнообразием высокотехнологичных и эффективных способов [9]. Это связано непосредственно с повышением эффективности научных исследований, достигаемой за счет использования современных методов математического, компьютерного и физического моделирования [10-15]. При всем многообразии существующих способов получения бесшовных труб, тенденцией мирового развития, как одного из основных, является применение в линии трубопрокатного агрегата непрерывного раскатного стана продольной прокатки [16-19].

## **1.1 Особенности технологии и оборудования непрерывных раскатных станов продольной прокатки**

Интенсивное развитие производства бесшовных труб на ТПА с непрерывным раскатным станом в отечественной и зарубежной практике получило в 70-80 гг. прошлого столетия. В это время вводятся в эксплуатацию непрерывные раскатные станы на Первоуральском, Волжском, Синарском трубных заводах, а также в Германии, Италии, Австрии, Китае, Бразилии, Америке и др. странах мира [20].

Прогрессивность данного способа, в сравнении с пилигримовыми и автоматическими станами, обуславливается как высокой производительностью, так и экономическими показателями [9, 17, 19, 21-29]. Раскатка гильз на

автоматических станах осуществляется на короткой неподвижной оправке, что обуславливает ограничение по длине раскатываемых труб. Кроме того, авторы в работах [20-35] выделяют ряд недостатков данного процесса раскатки. В частности, процесс деформации характеризуется дополнительными сдвигами металла, изменением главного направления течения и появлением растягивающих напряжений в выпусках калибра [5]. Это, в свою очередь, способствуют появлению дефектов на наружной поверхности, а наличие возвратно-поступательного движения раската способствует появлению рисок на его внутренней поверхности. Кроме того, неравномерность деформации по периметру поперечного сечения очага деформации является одним из факторов наведения повышенной разнотолщинности стенки раската.

В свою очередь речные станы, в сравнении с автоматическими, обеспечивают достаточную точность раската по толщине стенки и наружному диаметру, однако, также уступают по производительности непрерывным раскатным станам, так как сортамент производимых труб на ТПА с речным станом значительно уже [17, 24, 27, 36]. К основным недостаткам речных станов также следует отнести высокую стоимость оправок (дорнов) [37]. Кроме того, авторы в работах [17, 24, 30, 32, 35, 37-39, 40, 41] отмечают повышенную разнотолщинность, винтовые подрезы и внутренние риски, как наиболее часто встречающиеся виды брака.

При производстве бесшовных труб в линии ТПА с непрерывным раскатным станом полузаготовку (гильзу) раскатывают в передельную трубу, как правило, одного, двух или трех наружных диаметров с требуемой толщиной стенки. С целью расширения производимого сортаментного ряда труб окончательное формирование толщины стенки и наружного диаметра осуществляется на редуционно-растяжных и калибровочных станах. При этом формирование толщины стенки передельной трубы, при прокатке на непрерывном раскатном стане, в значительной мере определяет характер распределения продольной и поперечной разнотолщинности стенки и состояние поверхности на готовых трубах. Это в итоге и определяет качество производимого продукта [38, 39].

Отличительной особенностью непрерывной прокатки является то, что деформация раската осуществляется одновременно в нескольких клетях стана. При этом условия деформации в черновой, предчистовой и чистой группам клетей различны и определяются геометрическими параметрами калибровки валков. Взаимосвязь между клетями осуществляется через прокатываемый материал и оправку, характер движения которой также оказывает существенное влияние на параметры процесса раскатки. К основным преимуществам процесса раскатки на непрерывных раскатных станах следует отнести возможность получения передельных труб длиной до 40 м при скорости раскатки до 6,5 м/с [19, 40].

Раската труб на ТПА с непрерывным раскатным станом осуществляется на свободноплавающей (традиционный способ) и удерживаемой (перемещающейся с постоянной заданной скоростью) оправках. Раскатка труб на плавающей оправке осуществляется в 7-9 клетях с 2-валковыми калибрами. На сегодняшний день данный способ раскатки не находит широкого применения в виду своих недостатков. В частности, [41] длина и масса оправки ограничивает возможность получения труб диаметром более 200 мм, при прохождении оправки по клетям стана изменяется её скорость, что приводит и к изменению напряженного состояния. Это, в конечном счете, сказывается и на точности раската. Кроме того, для обеспечения требуемых условий извлечения трубы с оправки применяются калибры чистой группы клетей с большей величиной овальности, что дополнительно снижает точность раската по толщине стенки. Извлечение оправки из раскатанных труб осуществляется цепными оправкоизвлекателями, расположенными параллельно линии непрерывного стана, что также сказывается на производительности агрегата в целом.

Предпосылки к созданию новой технологии продольной прокатки труб на оправке были сделаны в 1958-1959 гг. А. Кальмесом (Albert Henri Calmes, Италия) [42-47], основная идея которой заключалась в раскатке полых заготовок в клетях с 2-валковыми калибрами на удерживаемой оправке, перемещающейся с постоянной заданной скоростью. На протяжении последующих нескольких лет были проведены экспериментальные исследования новой технологии, в последствии

получившей название МРМ. В октябре 1964 г. А. Кальмесом подана заявка на новый способ прокатки, правообладателями которой являлись Дж. П. Кальмес (J.P. Calmes) и Tube Mill Holding [48-50]. Следует отметить, что первоначально аббревиатура МРМ расшифровывалась как "Multi-Stand Pilger Mill", однако в последствии от нее отказались в пользу "Multistand Pipe Mill". В 1977 г. компанией Inncenti Santeustacchio S.p.A (Италия) совместно с Дж. П. Кальмесом разработан и получен патент на устройство (ретайнер) контроля скорости передвижения оправки при прокатке на непрерывных раскатных станах [51, 52].

Технология МРМ впервые была внедрена и освоена в Италии на трубопрокатном заводе Dalmine Bergamo, позднее на заводах U.S Steel Feirfield и др. [43-46]. Для извлечения раската с оправки в линии прокатки предусмотрен стан-извлекатель, расположенный в одной оси с непрерывным раскатным станом, что позволило существенно повысить точность труб по толщине стенки и наружному диаметру и производительность ТПА в целом. Постоянство скорости перемещения оправок в процессе раскатки, обеспечиваемую механизмом удержания оправки (ретайнер), позволило сократить длину и массу используемых оправок. Кроме того, технология МРМ позволила раскатывать трубы с большим параметром тонкостенности D/S. Последующее десятилетие характеризовалось интенсивным внедрением непрерывных раскатных станом типа МРМ. В то же время технология МРМ, в процессе её освоения, претерпевала некоторые изменения, в частности, на основании источников [44, 45, 47, 53, 54], отмечается тренд по снижению количества клеток стана МРМ в зависимости от года ввода в эксплуатацию стана.

С 1991 г. итальянской компанией «INNSE» совместно с Дж. П. Кальмесом [55] были проведены исследования по совершенствованию оборудования и технологии раскатки на стане МРМ [54, 55]. Разработанная конструкция нового раскатного стана предусматривала использование 3-валковых клеток вместо 2-валковых, применяемых на стане МРМ. Также в последующие 5 лет были проведены работы [43, 55-60] по автоматизации линии ТПА с непрерывным раскатным станом. На основании этих работ были разработаны и внедрены в технологический процесс: система автоматической оптимизации Carta, система

обеспечения качества QAS, а позднее и измерительная система LASUS [43, 55-59]. Кроме того, неотъемлемой особенностью раскатных станов стало использование индивидуального привода валков и автоматизированных гидравлических капсул (HCCS) [60], предназначенных для сведения и разведения валков калибра, а также регистрации усилий на валки в процессе прокатки.

В 1993 г. на Гонконгском Международном Саммите, В. Палмом (Компания «INNSE») была официально презентована технология PQF (Premium Quality Finishing) – для раскатки полых заготовок в клетях с 3-валковыми калибрами на удерживаемой оправке [55, 61-63]. А в 1996 компания «INNSE» представила готовый проект и стоимость основного оборудования стана PQF 16  $\frac{3}{4}$ .

Конструктивной особенностью первого непрерывного раскатного стана PQF было использование станины туннельного типа – PQF-ACO (Axial Change Over) [54, 60, 64, 65], позволяющей осуществлять перевалку клетей в направлении оси прокатки. Однако использование данной конструкции имело свои ограничения в виду того, что перевалка осуществлялась одновременно для всего комплекта клетей, собранных в одну кассету. Для извлечения валков из клетки, в данной конструкции, предусмотрена система рычагов, позволяющая осуществлять поворот относительно своей оси [60, 66-68, 78, 79]. Правильность выставления калибра обеспечивается путем установки подкладок требуемой толщины на специализированном стенде настройки клетей. Для радиального смещения валков, с целью обеспечения требуемой высоты калибра, предусмотрено гидравлическое устройство, смонтированного в станине стана.

В сентябре 2001 года компания «SMS Meer» заключила контракт на строительство ТПА со станом PQF-ACO 6  $\frac{5}{8}$  с китайским производителем бесшовных труб TRCO расположенном в г. Тяньцзине. И в августе 2003 состоялся официальный пуск первого в мире стана PQF 6  $\frac{5}{8}$ . Стан PQF имел в составе 7 клетей 3-валкового типа [55, 62, 64]. Следует отметить, что станы подобного типа, конструкции PQF-ACO, установлены и успешно эксплуатируются в Бразилии (VSB), КНР (Yantai Baosteel Tube, Baotou Steel, Jiangsu Tianhuai Pipe Co.), Германии (V&M) и Саудовской Аравии (ArcelorMittal).

В 2006 г. компания «SMS Meer» разработала новую конструкцию стана – PQF-PLUS LCO (Lateral Change Over) [55, 66], позволяющую осуществлять замену отдельных клетей в боковом направлении, перпендикулярном оси прокатки. Разработанная конструкция PQF-LCO позволила компенсировать ограничения, имеющиеся у PQF-ACO. Новая конструкция стана PQF 6<sup>5</sup>/<sub>8</sub>" была реализована во второй половине 2007 г. в ОАО «БМЗ» (Беларусь) [55].

В российском трубном дивизионе первый непрерывный раскатной стан типа PQF-LCO 10<sup>3</sup>/<sub>4</sub>" был пущен в эксплуатацию на предприятии ПАО «ТАГМЕТ» в ноябре 2008 г [69]. Стан имеет 5 клетей 3-валкового типа. Извлечение раската с оправки и его последующее калибрование осуществляется на 8-клетевом извлекательно-калибровочном стане 3-валкового типа [70]. Станы конструкции PQF-LCO, также установлены в Индии (Jindal SAW Pipes, ISMT Ltd.), Мексике (Tenaris TAMSA) и КНР (TPCO, Angang New Iron and Steel, Jiangsu Xigang, Baotou Steel, Hengyang Valin Steel Tube).

На сегодняшний день компанией «SMS Meer» освоена конструкция станов PQF-BCO (Bilateral Change Over), позволяющая осуществлять замену клетей в боковом направлении, перпендикулярном оси прокатки, как с левой, так и с правой выдачей клетей [71]. Станы подобного типа эксплуатируются в США на производственных площадках TPCO-Gregory / Corpus Christi и Tenaris-Bay City.

Особое внимание следует уделить, пущенному в мае 2012 г. в Jiangsu Tianhuai Pipe (Китай) стану PQF 20", предназначенного для раскатки труб наружным диаметром от 245 мм до 508 мм, с толщиной стенки от 6,1 мм до 60,0 мм [72]. На сегодняшний день данный стан является крупнейшим в мире непрерывным раскатным станом с 3-валковыми клетями для производства бесшовных труб. Стан имеет 5 клетей 3-валкового типа. Извлечение раската с оправки осуществляется на 3-клетевом стане-извлекателе 3-валкового типа. Калибрование осуществляется на 12-клетевом 3-валковом калибровочном стане.

В марте 2007 г. компания «Danieli» презентовала свой 3-валковый раскатной стан с удерживаемой оправкой FQM™ (Fine Quality Mill) для производства высококачественных бесшовных труб [73, 74]. Конструкция стана FQM

концептуально повторяет стан PQF-АСО. Отличительная особенность заключается в доработке клеток, регулировка валков в которых осуществляется строго в радиальном направлении, в отличие от клеток PQF, имеющих рычажную систему [60, 66-68]. Ввод в эксплуатацию первых ТПА с непрерывным раскатным станом FQM был осуществлен в КНР [71, 73, 74] компанией Chengdu I&S Co Ltd (Pangang Group), для производства труб наружным диаметром от 48,3 мм до 177,8 мм, производительностью до 350 000 тонн в год. А также в Саудовской Аравии на предприятии JESCO (Jubail Energy Services Co.) – стан FQM 14" [71] с производительностью до 400 000 тонн в год.

В российском трубном дивизионе официальный пуск первого стана FQM 14  $\frac{3}{8}$ " для производства труб наружным диаметром от 168 мм до 340 мм, производительностью до 600 000 тонн в год, состоялся в июле 2014 г. на предприятии ПАО «СТЗ» (г. Полевской, Россия) [75]. Раскатка полых заготовок (гильз) осуществляется в 5 клетевом стане 3-валкового типа с удерживаемой оправкой. Извлечение раската с оправки осуществляется 3-клетевым станом-извлекателем. Калибрование осуществляется на 14-клетевом калибровочном стане 3-валкового типа фирмы KOCKS. Правка труб осуществляется на 6-ти валковой трубоправильной машине фирмы BRONX.

На сегодняшний день стан FQM 14  $\frac{3}{8}$ " является одним из передовых и высокоавтоматизированных станов для производства бесшовных труб, функционирующих в России. Для повышения качества раскатываемых труб, стабильности протекания процесса раскатки, а также повышения выхода годного стан FQM имеет различные системы автоматического управления, в частности, систему автоматической настройки частоты вращения валков раскатного стана – ALS; систему компенсации динамической нагрузки при захвате раската – ISC; систему адаптивной балансировки валков – AFB; систему адаптивной компенсаций упругой деформации рабочего инструмента – АММС; систему гидроутопления концов труб – FTT; систему автоматической настройки частоты вращения валков стана-извлекателя – EDC и другие. В российском трубном дивизионе станы типа



PQF и FQM функционируют на производственных предприятиях, входящих в Трубную Металлургическую Компанию (ТМК).

Анализ литературных источников показал, что внедрение и освоение первых непрерывных раскатных станов типа PQF и FQM было осуществлено на производственных предприятиях КНР, что способствовало появлению первых работ по сравнительному анализу технологии производства труб с использованием раскатных станов с 2-х (MPM) и 3-валковыми клетями (PQF и FQM). Так, например, R. Jin (Baosteel) в работе [43] приводит сравнительную характеристику станов PQF и MPM на основе имеющего опыта эксплуатации. По приведенным данным следует, что технология раскатки полых заготовок на ТПА со станом PQF обеспечивает более высокие показатели как по точности толщины стенки и наружному диаметру раскатываемых труб, так и по расходу (износу) инструмента и выходу годного.

Автором работы [55] приводятся экспериментальные зависимости поля распределения толщины стенки от параметра тонкостенности  $D/S$  по результатам которых следует, что раскатные станы с 3-валковыми клетями в сравнении с 2-валковыми обеспечивают точность труб по толщине стенки выше. Z. Yan и др. (Tianjin Steel Pipe Co., Ltd., Китай) в работе [65] проводят сравнительный анализ технологии PQF и MPM при раскатке труб наружным диаметром 139,70 с толщиной стенки 7,72 мм. По приведенным данным, длина некондиционного заднего конца передельной трубы, полученной по технологии PQF, значительно меньше, что свидетельствует о снижении величины концевой обрезки труб и расходного коэффициента металла.

Учитывая имеющийся опыт эксплуатации и данные рекламных проспектов поставщиков оборудования «SMS Meer» и «Danieli» основными преимуществами процесса раскатки полых заготовок (гильз) на раскатных станах 3-валковыми клетями и удерживаемой оправкой типа PQF и FQM в сравнении с 2-валковыми типа MPM, являются [37, 40, 43, 44-47, 53-79]:

- прокатка труб с более высоким отношением наружного диаметра к толщине стенки  $D/S$ ;

- снижение поля отклонения по толщине стенки и наружному диаметру прокатываемых труб;
- более равномерная деформация за счет меньшего вреза калибра и перепада окружных скоростей по периметру калибра;
- обеспечение большей вытяжной способности;
- возможность прокатки труб из высоколегированных марок стали за счет больших сжимающих напряжений по периметру калибра;
- снижение количества дефектов прокатного происхождения, в частности, разрывов, образующихся по телу раската в выпусках калибра за счет меньшей величины растягивающих напряжений в выпусках калибра;
- меньший износ валков за счет меньшего перепада окружных скоростей и равномерности деформирования раската по периметру калибра;
- меньшая длина (масса) рабочей части оправки;
- уменьшение парка оправок и, соответственно, времени, затраченного на перевалку.

Таким образом, современный уровень развития технологии и оборудования для раскатки полых заготовок (гильз), как в России, так и за рубежом базируется на применении непрерывных раскатных станов с 3-валковыми клетями и удерживаемой оправкой типа PQF и FQM. Для извлечения раската с оправки используется 3-валковый стан-извлекатель, имеющий общую ось прокатки с непрерывным раскатным станом.

Следует подчеркнуть, что 3-валковые раскатные станы типа PQF и FQM на предприятиях РФ введены в эксплуатацию в 2008 (PQF) и 2014 (FQM) гг. Информации об особенностях технологии раскатки бесшовных труб с использованием 3-валковых раскатных станов продольной прокатки в технической литературе, как в России, так и за рубежом отражено не в полном объеме. В частности, в виду сокращения количества клеток (до 5 шт.), в раскатных станах с 3-валковыми клетями происходит перераспределение деформации металла и увеличиваются разовые обжатия в черновой (№№ 1, 2), предчистовой (№ 3) и чистовой (№№ 4, 5) группах клеток стана. При этом, как отмечают авторы [37, 76,

79-85], в процессе деформации раската, в частности, в клетях №№ 1, 2 учувствуют галтели валков, что свидетельствует о чрезмерном затекании металла (переполнение калибра) в межвалковые промежутки, что в итоге приводит к повышенной неравномерности деформации и риска возникновения дефектов прокатного происхождения.

Одним из направлений, способствующему снижению неравномерности деформации металла в черновых калибрах, является разработка в ОАО «РосНИТИ» усовершенствованных калибров [81, 83, 85, 86]. Их промышленное исследование подтвердило целесообразность использования в непрерывных раскатных станах с 3-валковыми клетями типа PQF и FQM. Следует отметить, что данное техническое решение подтвердило свою целесообразность и при проектировании новой системы калибров раскатного стана с 2-валковыми клетями типа MPM. Однако, до настоящего времени не определены полностью резервы совершенствования технологии раскатки в чистовых калибрах, процесс деформации в которых является одним из определяющих с точки зрения окончательного формирования толщины стенки передельной трубы. Этот процесс также в значительной мере определяет и характер распределения продольной, поперечной разнотолщинности стенки и состояние поверхности готовых труб.

Кроме того, раскатка в чистовых калибрах формирует условия необходимые для извлечения раската с оправки станом-извлекателем. А с учетом того, что взаимосвязь между клетями осуществляется через прокатываемый материал и оправку, характер формоизменения раската, условия захвата, условия извлечения раската с оправки и стабильность протекания процесса раскатки во многом определяются формой чистовых калибров и скоростью удержания оправки.

Таким образом, проведение более детального анализа процесса раскатки гильз с использованием непрерывных раскатных станом с 3-валковыми клетями позволит выявить наиболее значимые параметры процесса раскатки и условия по их осуществимости с целью дальнейшего совершенствования технологии.

## 1.2 Влияние калибровки валков и параметров процесса раскатки на качество передельных труб

Раскатка гильзы в передельную трубу в непрерывном раскатном стане осуществляется в последовательно расположенных обжимных, предчистовых и чистовых калибрах, отличительной особенностью которых является наличие трех основных зон по периметру поперечного сечения очага деформации [70]:

- зона обжатия толщины стенки по вершине калибра, характеризующаяся максимальным относительным обжатием по стенке  $\Delta S/S$ ;
- переходная зона – зона в которой деформация раската между валком и оправкой осуществляется при постепенном уменьшении параметра  $\Delta S/S$ ;
- зона редуцирования или внеконтактная зона – зона, в которой металл в процессе деформации не контактирует с оправкой.

Возникающие по периметру поперечного сечения очага деформации продольные напряжения имеют знакопеременные значения [9, 17, 37, 39, 70, 87-89]: в вершине калибра – напряжения сжатия, в выпусках калибра – напряжения растяжения. Причем напряжения растяжения влияют на изменение геометрических параметров раската во внеконтактной зоне калибра и их рост обуславливает риск возникновения дефектов в виде разрывов металла по телу труб [80].

При этом рост продольных растягивающих напряжений, действующих в межклетевом промежутке, приводит к увеличению угла охвата оправки металлом, что ухудшает условия ее извлечения, поэтому оправочную прокатку, в частности в чистовых калибрах, следует вести без натяжения либо при небольших его значениях [90]. Таким образом, форма калибра оказывает существенное влияние, как на характер распределения толщины стенки по периметру поперечного сечения трубы, так и на напряженно-деформированное состояние металла.

На основании источников [16-19, 35, 70, 81, 88, 89, 91-100] к основным формам калибров следует отнести: с круглой или овальной обжимной зоной и выпусками, выполненными по прямой; с круглой или овальной обжимной зоной и выпусками, выполненными по радиусу; овальные калибры – 1-радиусные.

Калибры с круглой или овальной обжимной зоной и выпусками, выполненными по прямой, применяются исключительно в первой клетке стана с 2-валковыми клетями, с целью обеспечения требуемых условий необходимых при захвате гильзы. Однако данная форма калибра за счет большей величины овальности способствуют значительной неравномерности деформации по периметру поперечного сечения раската. Соответственно, использование выпуска в чистовых калибрах в виде прямой нецелесообразно.

Калибры с круглой или овальной обжимной зоной и выпусками, выполненными по радиусу находят широкое применение в станах как с 2-х, так и 3-валковыми клетями. Калибры с овальной обжимной зоной и выпусками, выполненными по радиусу, как правило, применяются в черновых и предчистовых клетях стана. Геометрическое построение обжимной зоны калибра, с учетом эксцентриситета, обеспечивает компенсацию величины износа калибра в процессе прокатной кампании валков. Калибры с круглой обжимной зоной и выпусками, выполненными по радиусу чаще всего используются в чистовых клетях стана с целью обеспечения минимальной разнотолщинностью стенки. В свою очередь круглые калибры способствуют повышению угла охвата оправки.

Овальные калибры применяются, как правило, с целью обеспечения отрыва раската от оправки. Серьезным недостатком овальных калибров является повышенная поперечная разнотолщинность стенки раската, связанная с эксцентricностью профиля калибра относительно оправки [37, 70, 101].

Помимо основных видов, авторы в работах [16, 81, 86, 100] также выделяют калибры: зонального типа [81, 86], шестигранные [100], овальные с прямыми или радиусными выпусками и ограничителем уширения [16]. Анализируя данные виды калибров с точки зрения их применимости в чистовых клетях непрерывного раскатного стана следует отметить:

- овальные или круглые калибры с прямым или радиусным выпуском и ограничителем уширения способствуют ухудшению качества труб в следствие того [16], что участок боковой части ручья, образованный прямой линией, придает граненность поперечному сечению трубы, которая часто сохраняется на готовых

трубах и является причиной ужимов при редуцировании. Следовательно, калибры с участком ограничения уширения целесообразно использовать только в обжимной группе клетей;

- неравномерность формоизменения в поперечном сечении трубы резко снижается с увеличением числа валков в клети или граней в калибре вследствие выравнивания вытяжки по периметру поперечного сечения [100]. Однако, использование калибров шестигранного типа в чистовых клетях раскатного стана, негативно сказывается на качестве наружной и внутренней поверхности в связи с сильным искажением профиля передельной трубы.

- использование калибров зонального типа [86], применительно к технологии раскатки в чистовых клетях раскатного стана, не находит применения, в связи с тем, что максимальное обжатие по периметру поперечного сечения очага деформации сосредоточено не в вершине калибра, а в его переходной зоне, соответственно, при прокатке в предпоследней чистовой клети толщина стенки в вершине калибра будет иметь максимальное значение, а на выходе из последнего, с учетом утолщения стенки в выпуске калибра, неравномерность будет возрастать.

К основным видам разнотолщинности стенки при раскатке бесшовных труб в линии ТПА относятся: эксцентricность и гранёность [39, 70]. Образование эксцентricности в большинстве случаев обусловлено прошивкой заготовки и смещением оси прокатки. Гранёность обусловлена неравномерностью деформации при раскатке труб в калибрах различных видов [70, 76].

Рассматривая ту или иную форму калибра, с точки зрения повышения точности раскатываемых труб и возможности его применения в чистовых клетях стана, основополагающей характеристикой любой формы является величина овальности, определяемая отношением ширины ( $B/2$ ) калибра к его высоте ( $H/2$ ) [5, 9, 18, 24, 31, 34, 37, 67, 70, 81, 83, 88, 101-106].

Многочисленными исследованиями: Ю.М. Матвеева, А.П. Чекмарева, Я.Л. Ваткина, И.П. Савкина, В.В. Швейкина, Г.И. Гуляева, Ф.А. Данилова, В.Н. Данченко, Ю.И. Блинова и др. установлено, что использование овальной формы калибра в сравнении с круглой способствует значительному течению металла в

поперечном направлении (уширению). Объясняя это тем, что захват металла в овальном калибре происходит преимущественно в его вершине, а в круглом – в зоне выпусков, что, в свою очередь, ограничивает уширение и способствует течению металла в продольном направлении. Поэтому с точки зрения повышения точности раскатываемых труб прокатку следует вести в круглых калибрах с выпусками, выполненными по радиусу.

Следует отметить, что данные исследования проводились исключительно для станков с 2-валковыми калибрами. Принцип построения 2-валковых калибров отличается от клетей с 3-валковыми калибрами, в частности, за счет увеличения вреза калибра и перепада окружных скоростей по периметру калибра, изменений условий деформирования по клетям стана и режима работы удержания оправки не позволяет в полном объеме перенять накопленный опыт для изучения и совершенствования технологии раскатки гильз с использованием непрерывных раскатных станков с 3-валковыми клетями.

Руководствуясь рекомендациями авторов работ [37, 40, 70] и имеющимся опытом эксплуатации [69-72, 80, 82-84, 101-106] непрерывных раскатных станков 3-валкового типа, в чистовых клетях следует применять калибры с круглой обжимной зоной и выпусками, выполненными по радиусу. В работах [37, 40] углы выпусков рекомендуется задавать равными  $30^\circ$  для всех клетей стана. Следует отметить, что калибры чистовых клетей (двух последних клетей) имеют идентичную калибровку валков [37, 40, 70]. Отношение углов обжимной зоны калибра ( $\alpha_{оз}$ ) и зоны выпуска ( $\alpha_{зв}$ ) равно 1, то есть при прочих равных условиях, стенка, соответствующая зоне выпуска калибра предшествующей клетки гарантировано перекрывается в обжимной зоне последующей клетки, что также способствует уменьшению длины переходной зоны и соответственно повышению точности раскатываемых труб [83, 85, 108].

Также в [40] отмечается возможность использования в третьей либо в четвертой клетях, соответственно для 5-и и 6-и клетевых стана, большего угла выпуска ( $30-32^\circ$ ) с целью обеспечения необходимого отрыва раската от оправки. В свою очередь, в работе [70] отмечена целесообразность, с точки зрения

повышения точности, использования в чистовых клетях стана схемы прокатки с "перекрытием" – с меньшим углом выпуска.

В работе [37] рекомендуется назначать величину овальности чистовых калибров стана из диапазона  $1,08 \div 1,09$ , при этом данная величина никак не регламентируется с точки зрения ограничений параметров процесса раскатки, в частности угла охвата оправки. Там же отмечается, что при раскатке труб с параметром тонкостенности  $D/S \geq 20$  с использованием 5-клетевого стана окончательного формирования стенки не происходит в виду утолщенных участков, соответствующих выпускам калибра. В данной связи, предлагается использование дополнительной 6 клетки. Однако, внедрение новых узлов и механизмов стана, всегда связано со значительными финансовыми затратами, не всегда оправдывающих себя. Поэтому на первом шаге необходимо уметь извлекать имеющиеся резервы существующей технологии, в частности, за счет рационального соотношения форм калибров чистовых клетей, способствующих повышению точности труб по толщине стенки и обеспечивающих стабильное протекание процесса раскатки.

Принципы построения калибровки валков 3-валкового калибра, при прокатке сплошных профилей представлены в работе [108], однако, данные рекомендации носят общий характер, на основании которых не предоставляется возможным осуществить расчет профиля калибра, кроме того, формоизменение раската при деформации сплошных и полых профилей имеет существенные отличия.

Анализируя имеющийся опыт эксплуатации станов с 2-валковыми калибрами, авторы в работах [17, 19, 95, 101, 109] рекомендуют для 9-клетевого стана в первых двух клетях применять калибры с овальностью  $1,20-1,25$ , в клетях с третьей по пятую – свободные калибры, с овальностью  $1,25-1,30$ , в шестой и седьмой клетях, формирующих готовую стенку – тесные калибры, с овальностью  $1,24-1,25$ , а в двух последних (скругляющих) –  $1,02-1,06$ . Там же отмечается, что ширина последнего чистового калибра может быть определена в зависимости от идеального наружного диаметра передельной трубы из выражения  $1,04D_u$ . В работе [101] представлен оптимальный диапазон овальности калибра  $1,24 \div 1,28$ , при этом



отмечается, что овальность калибра может быть снижена (до 1,15) лишь в первой клетке стана. В работе [109] отмечается, что при отношении ширины калибра к его высоте равном  $1,04 \div 1,14$  переполнение отсутствует. При прокатке в 2-валковом калибре наблюдается утонение стенки порядка  $15 \div 20$  % [19]. В последних клетях стана прокатку стремятся вести при минимальном угле охвата оправки.

В виду сокращения количества клеток и перераспределения режимов деформации при прокатке труб в линии ТПА с непрерывным раскатным станом с 3-валковыми клетями, передельная труба на выходе из стана охватывает оправку с определенным углом [37, 40, 70, 103, 107, 118], однако, его предельная величина до настоящего времени не определена. При проектировании новых систем калибров, в частности при построении калибровки валков в чистовых клетях стана в основе, как правило, лежит опыт эксплуатации поставщика оборудования. Кроме того, оптимальный диапазон овальности определяется исключительно решением оптимизационной задачи, учитывающей научно обоснованную систему ограничений процесса прокатки, что до настоящего времени для раскатных станом с 3-валковыми клетями не осуществлялось.

Анализируя параметры процесса раскатки в чистовых калибрах на ТПА с непрерывными раскатными станом с 3-валковыми клетями, функционирующими на предприятиях TRCO. Ltd (КНР), ПАО СТЗ (РФ), ПАО ТАГМЕТ (РФ), ОАО БМЗ (РБ) [37, 82, 83, 103-106] можно отметить:

- обжатие по толщине стенки раската осуществляется в диапазоне от 22,0 до 33,0 % для предпоследней клетки стана и от 2,0 до 8,0 % для последней;
- коэффициент вытяжки изменяется от 1,12 до 1,20 в предпоследней клетки стана и от 1,01 до 1,10 в последней;
- межвалковый зазор изменяется в диапазоне от 9,0 мм до 20 мм;
- величина овальности калибров предпоследней и последней клетки имеет идентичную величину и изменяется от 1,085 до 1,090.

Следует отметить, что до настоящего времени исследования по влиянию величины овальности чистовых 3-валковых калибров и их рациональному соотношению, с точки зрения точности труб и стабильности протекания процесса

раскатки в полной мере не были проведены. Так, например, в работе [110] авторами предложен способ продольной прокатки труб, в котором геометрические параметры калибровок валков по клетям непрерывного раскатного стана определяются отношением периметров калибров, при этом отношение длины окружности наружной поверхности гильзы к длине окружности раската (передельной трубы) на выходе из последней чистовой клетки стана составляет по меньшей мере 1,1 либо менее. При таком проектировании системы калибров не ограничены диапазоны варьирования величины овальности калибров чистовых клеток и не регламентирована величина угла охвата оправки, что впоследствии может приводить к образованию дефектов поверхности и возникновению аварийных ситуаций в процессе прокатки.

Авторами в работе [111] предложен технологический инструмент, содержащий систему калибров, в которой каждый последующий черновой калибр выполнен с угловой протяженностью центральной дуги на  $4\div 6$  % больше, чем предыдущий. При прокатке труб с использованием данного технологического инструмента в последней чистовой клетке непрерывного раскатного стана, в следствие увеличения угла обжимной зоны калибра, угол охвата оправки будет критический. В итоге, извлечение раската с оправки будет затруднено либо невозможно.

Авторами в работе [112] предложен технологический инструмент для продольной прокатки труб, содержащий калибры уменьшающегося поперечного сечения, образованные ручьями валков. Каждый ручей образован сопряженными между собой центральной дугой и дугами радиусных выпусков калибра, выполненными радиусом, равным радиусу центральной дуги. Такая форма ручья валка в чистовых клетях стана не обеспечивает равномерного распределения толщины стенки раската по периметру поперечного сечения в зоне очага деформации, так как обжатия толщины стенки, соответствующие обжимной зоне калибра, будут распределены неравномерно, зона интенсивной деформации для трехвалковых калибров будет смещена на угол  $30^\circ$  от вершины калибра, что приведет к дополнительному охвату оправки.

Авторами в работе [113] предложен оправочный стан, состоящий из двух или более клетей, калибры которых образованы тремя калиброванным валками. Профиль ручья валка образован центральной дугой, характеризующейся углом, определяющим обжимную зону, и дугами радиусных выпусков с определенным углом выпуска калибра, которые определяют профиль раската в межвалковом пространстве. Однако при деформации металла в зоне выпусков калибра имеет место утонение и утолщение стенки раската, при этом, изменение толщины стенки зависит от ширины калибра, определяющей радиус выпуска и соответствующие ему углы. Таким образом, несоблюдение ограничений по ширине калибра может приводить, с одной стороны, к повышенной разнотолщинности стенки в поперечном сечении раската, с другой – к увеличению угла охвата оправки.

Таким образом, приведенные в работах [110-112] технические решения, направленные на повышение точности раскатываемых труб, не подкреплены данными по предельным величинам, в частности, ширины и овальности калибра которые в большинстве случаев определяют, как качество труб, так и стабильность протекания процесса раскати (обеспечение требуемого угла охвата оправки).

Рассматривая технологию прокатки труб в чистовых клетях с точки зрения повышения качества и стабильности протекания процесса прокатки, одной из важных задач теории и технологии прокатки [114] является обеспечение надежного захвата металла валками. При рассмотрении процессов продольной прокатки труб на оправке принято различать первичный захват и вторичный каждый из которых имеет свои особенности [5, 9, 115, 116]. Первичный захват охватывает период с момента соприкосновения раската валками до касания его с оправкой. Вторичный захват начинается в плоскости окончания зоны редуцирования (контакт с оправкой) и начала зоны обжатия по стенке [115, 116].

Условия первичного и вторичного захвата при продольной прокатке труб рассмотрены в работах [5, 9, 115]. Данные условия выведены для случая прокатки в 2-валковых калибрах в первых клетях стана, размеры и принцип калибровки которых отличаются от клетей с 3-валковыми калибрами. Условия захвата при прокатке в многовалковых калибрах достаточно подробно рассмотрены в работе

[108], однако, это сделано для технологии прокатки сплошных профилей, условия которой отличаются от условий прокатки полых профилей на оправке. Кроме того, условия захвата металла валками при прокатке в черновой и чистовой группах клетей раскатного стана будут иметь существенные различия в частности с точки зрения отношения скоростей оправки и раската, параметров калибровки валков и прочих значимых параметров. Следует отметить, что до настоящего времени данных исследований не было проведено.

### **1.3 Теоретические основы процесса непрерывной продольной прокатки труб**

С целью обеспечения постоянно растущих требований, предъявляемых к качеству трубной продукции, и минимизации рисков возникновения аварийных ситуаций на производстве исследуются и решаются три основные задачи теории прокатки [70, 117]:

#### 1. Разработка теории расчёта усилий, действующих на валки в процессе прокатки

При правильном определении усилия, представляется возможным изготавливать надёжные, компактные станы с минимальными затратами, а в условиях эксплуатации достигать высокой производительности за счёт обоснованного использования заложенных в конструкцию стана резервов по их прочности и мощности.

#### 2. Разработка теории формоизменения

Основным вопросом этого направления является определение продольной и поперечной деформации прокатываемого металла в данных конкретных условиях. Разработка рациональной формы калибра как для отдельно взятой клетки, так и для всей системы калибров, определяемой на основе научно обоснованной системы ограничений, имеет особое значение как с точки зрения повышения точности труб по толщине стенки и снижения дефектов поверхности прокатного происхождения, так и конкурентоспособности и увеличения прибыльности предприятия за счет повышения качества производимой продукции.

### 3. Разработка вопросов динамики процессов прокатки

Основной задачей направления является исследование взаимодействия раскатываемого металла и инструмента (валки, оправка). Исследование динамики процесса позволяет определить такие важные величины как момент и мощность прокатки, скоростные факторы процесса, условия взаимодействия раската с инструментом при захвате валками и прочие. В частности, прокатка в чистовых калибрах сопровождается отрицательным воздействием оправки на раскат, что негативно сказывается, как на условия вторичного захвата, так и при заполнении межклетвого промежутка, следовательно, определение рациональной формы калибра с учетом ограничений параметров процесса прокатки, учитывающей взаимодействие оправки в процессе деформации позволит повысить качество передельных труб и предотвратить возможность возникновения аварийных ситуаций.

В теории и практике калибрования и редуцирования труб применение 3-валкового калибра известно достаточно давно. Построение калибровки валков как для 2-х, так и 3-валкового калибра во многом идентично. Исключением является выбор величины овальности калибра, определяемой, согласно работе [119], степенью редуцирования и эмпирическим коэффициентом, учитывающим марку стали. Однако применение данной формулы нецелесообразно в следствие того, что характер формоизменения при ведении оправочной и безопрочной прокатки имеет существенные различия. Также в работах [119-121] значительное внимание уделено вопросам касающихся уширения раската, изменения толщины стенки в выпусках калибра (утонение / утолщение), потери устойчивости раската, расчёта предельных обжатий по клетям стана. Что до настоящего времени для раскатных станков 3-валкового типа в полном объеме не проводилось.

Исследования [95] Я.Л. Ваткина и И.П. Савкина позволили определить, что толщина стенки в выпуске калибра претерпевает изменения. Установлено, что при коэффициентах вытяжки в 2-валковом калибре до 1,1 наблюдается утолщение стенки, а при больших значениях – утонение, причем с ростом коэффициента вытяжки величина утонения возрастает. Следует отметить, что по настоящее время

имеющиеся методики для расчета геометрических параметров 3-валкового калибра [36, 70] данным фактом пренебрегают. Пределы применения формул, приведенных в работе [95] находятся в интервале относительного обжатия стенки  $10 \div 40$  %. Максимальное утонение стенки обычно составляет 15-20 %. В то же время их применение к чистовым клетям 3-валковых раскатных станов в явном виде нецелесообразно, вследствие того, что в последней клетке 3-валкового 5-клетевого стана, как было отмечено ранее, относительное обжатие стенки составляет не более 8,0 %. Кроме того, вследствие меньшей величины вреза калибра, условная граница коэффициента вытяжки, при котором деформация раската осуществляется без изменения толщины стенки в выпуске калибра, вероятно будет отличной от 1,1. Однако данных исследований до настоящего времени не проводилось.

Также в работе [95] приводится формула заполнения калибра, зависящая от величины уширения. Данный параметр является одним из определяющих при расчете условий захвата металла валками в чистовых калибрах. Однако помимо коэффициента вытяжки, овальность чистового калибра, величина которого во многом способствует формированию профиля поперечного сечения трубы, в явном виде не определена.

В работе [96] Я.Л. Ваткиным, А.А. Шевченко и др. проведены исследования влияния режимов натяжения и подпора на характер деформации трубы. В качестве модельного материала были выбраны свинцовые, алюминиевые и стальные трубы наружным диаметром 64 мм с толщиной стенки 7,0 мм. Исследования проводились на оправках диаметром 48 мм, по результатам которых определено, что:

- при прокатке с передним натяжением изменение коэффициента вытяжки, в сравнении с прокаткой без натяжения, не наблюдалось;

- относительное обжатие толщины стенки по вершине калибра и утонение стенки в выпусках калибра увеличилось соответственно с 10-14 % до 35-36 % и с 8 до 10-14 % при прокатке без натяжения;

- существенное влияние на изменение коэффициента вытяжки оказывает заднее натяжение, величина которого снизилась с 1,38-1,41 до 1,30-1,33, при этом

относительное утонение стенки и диаметр трубы в выпуске калибра остались примерно на уровне значений, полученных при прокатке без натяжения;

- при прокатке с передним подпором характер деформации трубы изменяется незначительно, в следствие того, что утонение стенки в выпуске и обжатие по вершине калибра практически не изменились;

- при прокатке с задним подпором коэффициент вытяжки уменьшается в зависимости от подпора с 1,34 до 1,33-1,26 при свободной прокатке. Стенка в выпуске калибра утолщается на 7-30 %, а отношение диаметров по выпуску в вершине калибра увеличивается до 1,21-1,34.

В [99] отмечается, что процесс раскатки труб происходит более стабильно при обеспечении режима прокатки без натяжения и подпора. В [122] отмечена целесообразность в увеличении межклетевого натяжения для станков с плавающей оправкой, причем для черновых клетей стана. Тем не менее, с целью обеспечения необходимых условий при извлечении раската с оправки станом-извлекателем и требуемых геометрических параметров передельных труб, в частности толщины стенки, процесс раскатки в чистовых калибрах необходимо осуществлять без натяжения и подпора.

Также, в работе [96] проанализировано влияние ускоренного и замедленного движения оправки при деформации раската в одном калибре, по результатам исследования установлено, что:

- при ускоренном движении оправки диаметр и стенка трубы в выпуске калибра существенно не изменяются по сравнению с прокаткой без натяжения и подпора, в то же время наблюдается увеличение относительного обжатия по толщине стенки в вершине калибра и коэффициента вытяжки с 1,34 до 1,37-1,41;

- при замедленном движении оправки характер деформации трубы подобен режиму ускоренного движения, однако утонение стенки трубы в выпуске калибра на 5-15 % больше.

В работе [123] опытно-промышленным путём установлено, что прокатку труб из высоколегированных марок стали целесообразно вести с учётом определённого соотношения скоростных параметров процесса прокатки, величина

изменения которого определяется из диапазона  $0,15 \div 0,7$ . Авторами отмечается, что при соблюдении данного условия обеспечиваются: рациональное использование эксплуатационного ресурса оправки, безаварийное извлечения раската с оправки и повышение качества поверхности труб. Следует отметить, что при чрезмерном угле охвата оправки, в частности, при раскатке в чистовых калибрах, где скорость оправки значительно ниже скорости раската, могут образовываться поперечные разрывы и подрезы, образующиеся в выпусках калибров. Однако, данных исследований до настоящего времени не проводилось. Соответственно, форма чистовых калибров, в частности, величина овальности, обеспечивающая повышение точности и стабильности протекания процесса раскатки должна быть регламентирована.

Экспериментальные исследования в работе [124] показали, что с точки зрения повышения точности раскатываемых труб, на ТПА с автоматическим станом применение оправки овальной формы способствует снижению уровня поперечной разнотолщинности в среднем на 3-4 %. Однако использование оправок подобного типа на ТПА с непрерывным раскатным станом крайне затруднено, как с точки зрения изготовления, так и её позиционирования.

В работе [125] представлены граничные условия позиционирования оправки при раскатке труб толстостенного сортамента, обеспечивающие стабильное протекание процесса в момент: захвата раската валками первой клетью раскатного стана; выхода раската из последней клетки стана; транспортировки раската к стану-извлекателю и захвата раската валками первой клетью стана-извлекателя.

Исследования А.П. Чекмарева, Я.Л. Ваткина и др. [126] позволили разработать метод определения внеочаговых сил трения на длинной оправке. По результатам которого были впервые определены данные по величине этих сил, зависящие, например: от внеочагового давления металла на оправку, качества смазки, чистоты поверхности оправки, степени её износа. В свою очередь значительные внеочаговые силы трения приводят к повышенному износу оправок и, следовательно, к ухудшению качества внутренней поверхности труб, а также к увеличению усилия, требующегося при извлечении оправки. С учетом того, что в



раскатных станах 3с валковыми калибрами охват оправки трубой больше, соответственно, действие этих сил оказывает существенное влияние при извлечении раската. Однако, подобные исследования для раскатных станов с 3-валковыми калибрами не проводились.

Исследования Г.И. Гуляева, И.П. Савкина и др. [98] позволили установить, что существенное влияние на формоизменение раската оказывает параметр  $l_{od}/D_{cp}$ . С увеличением отношения  $l_{od}/D_{cp}$  при прокатке толстостенных труб в калибрах с округленными выпусками увеличивается утолщение стенки в выпусках, что в свою очередь приводит к росту поперечной разнотолщинности, повышению усилия прокатки и увеличению угла охвата оправки. Это, в свою очередь, затрудняет извлечение раската с оправки и способствует повышенному износу оправки. В связи с этим не рекомендуются вести прокату в валках больших диаметров, приводящих к увеличению отношения  $l_{od}/D_{cp}$  до 1.

#### **1.4 Выводы и постановка задач исследования**

На основании обзора научно-технической информации следует отметить следующее:

- современный уровень развития технологии и оборудования для раскатки полых заготовок (гильз), как в России, так и за рубежом базируется на применении непрерывных раскатных станов с 3-валковыми клетями и удерживаемой оправкой типа PQF и FQM. Для извлечения раската с оправки используется стан-извлекатель, имеющий общую ось прокатки с непрерывным станом;

- процесс раскатки в чистовых калибрах является одним из определяющих с точки зрения окончательного формирования толщины стенки передельной трубы, который в значительной мере определяет характер распределения продольной и поперечной разнотолщинности;

- форма чистовых калибров, имеющих идентичную калибровку валков, и режим работы оправки при деформации в чистовых калибрах оказывают существенное влияние, как на характер распределение толщины стенки по периметру трубы, так и 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;

- овальность калибра выбирается, как правило, из диапазона, полученного на основе имеющегося опыта эксплуатации непрерывных станов, при этом не учитываются параметры 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;

- передельная труба на выходе из раскатного стана охватывает оправку с определенным углом, при этом его величина не регламентируется, а базируется исключительно на опыте эксплуатации поставщиков оборудования.

С учетом того, что скорость перемещения оправки в чистовых калибрах меньше скорости раската это негативно сказывается на условиях захвата раската валками, в частности, в момент касания раската оправки и при заполнении межклетевого промежутка. Наличие сопротивления перемещению раската, со стороны оправки, может привести к образованию разрывов на наружной поверхности, что в свою очередь накладывает определенные ограничения при выборе величины овальности чистовых калибров.

Таким образом, исследование технологии продольной прокатки на непрерывных раскатных станах с 3-валковыми клетями и её совершенствование за счет разработки нового подхода к повышению точности труб по толщине стенки базирующегося на решении оптимизационной задачи с учетом научно обоснованной системы ограничений на управляющие параметры процесса раскатки являются *актуальными* в настоящее время.

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

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

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

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ТРУБ В ЧИСТОВЫХ КЛЕТЯХ С 3-ВАЛКОВЫМИ КАЛИБРАМИ

### 2.1 Постановка задачи оптимизации процесса прокатки труб в чистовых клетях с 3-валковыми калибрами

Для определения оптимальных параметров процесса прокатки труб в чистовых калибрах используется аппарат математического программирования [15, 127-129], задача которого в общем случае заключается в следующем: дано некоторое множество  $X$ , заданное своими элементами  $x$ , которые удовлетворяют системе из  $m$  равенств и неравенств  $g_i(x) \geq 0$ . На этом множестве определена скалярная функция  $\gamma(x)$ , минимум которой необходимо определить:

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

где  $g_i$  – заданные скалярные функции.

Следовательно, для решения оптимизационной задачи необходимо:

1. Выбрать критерий оптимизации и управляющие параметры процесса;
2. Разработать научно обоснованную систему ограничений на управляющие параметры процесса;
3. Разработать алгоритм нахождения оптимального значения критерия оптимизации.

Следует отметить, что выбор критерия оптимизации и управляющих параметров процесса определяется на основании, достигаемой в процессе решения задачи, цели. Разработка алгоритма нахождения оптимального значения критерия оптимизации подразумевает определение рационального маршрута в области изменения управляющих параметров процесса с целью нахождения минимального или максимального значения целевой функции.

В свою очередь разработка научно обоснованной системы ограничений на управляющие параметры процесса является основополагающей. Определение и

математическое описание параметров системы ограничений лимитируют пределы варьирования управляющих параметров процесса, что в конечном итоге способствует нахождению оптимума целевой функции. Это, в свою очередь, определяет инновационность и теоретическую значимость разрабатываемой системы.

### 2.1.1 Критерий оптимизации и управляющие параметры процесса

Для решения поставленной задачи, в качестве критерия оптимизации, характеризующего точность раската на выходе из последней клетки стана, выбран доверительный интервал ( $D$ ) изменения толщины стенки, определяемый по формуле:

$$D = \sigma \cdot k_s, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение толщины стенки трубы от номинального значения;

$k_s$  – коэффициент Стьюдента.

Среднее квадратичное отклонение толщины стенки в поперечном сечении раската на выходе из последней клетки стана определяется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{i=1}^l (S_i - \bar{S})^2}, \quad (3)$$

где  $S_i$  – толщина стенки, измеренная в  $i$ -ом радиальном сечении;

$\bar{S}$  – среднее значение толщины стенки в данном сечении;

$l$  – количество измерений.

В качестве управляющих параметров процесса прокатки выбраны величины овальности калибров последней ( $\Theta_i$ ) и предпоследней ( $\Theta_{i-1}$ ) клетки непрерывного раскатного стана.

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

$$D = D(\Theta_{i-1}, \Theta_i), \quad (4)$$

### 2.1.2 Система ограничений на управляющие параметры процесса

Поскольку в целевой функции управляющими параметрами процесса раскатки в чистовых калибрах выбрана величина овальности калибра последней и предпоследней клетки стана, то система ограничений описывается относительно этих величин.

Очевидно, чем меньше величина овальности калибра  $\Theta = B/H$ , тем меньше разнотолщинность стенки трубы. В идеале минимальная разнотолщинность будет при величине овальности равной 1. Однако реализовать процесс, в виду отсутствия зоны свободного течения металла в поперечном направлении, будет невозможно. Скорее всего, это также будет влиять и на величину угла охвата оправки. Поэтому овальность делают несколько большей, но и в этом случае, ввиду определенного набора факторов, влияющих на процесс деформации в чистовых калибрах, имеются ограничения.

Во-первых, на станах с удерживаемой оправкой, скорость оправки, как правило больше скорости трубы может быть только на участке, соответствующему первой клетки. Но в любом случае, скорость перемещения оправки через последние чистовые клетки меньше, чем скорость перемещения трубы. Следовательно, вторичный захват (момент касания раската оправки) в чистовых клетях происходит в условиях отрицательного воздействия оправки. Это ещё усугубляется тем, что труба охватывает на части периметра оправку после выхода из предшествующей клетки, следовательно, это может способствовать ухудшению условий захвата. С другой стороны, даже если захват осуществился, площадь контактной поверхности между трубой и оправкой, по мере заполнения межклетевого промежутка увеличивается. Соответственно возможна ситуация, когда резервов сил трения на контактной поверхности трубы и вала будет недостаточно и дальнейшее осуществление процесса будет невозможным.

Во-вторых, оправка непрерывного стана оказывает существенное влияние на напряженное состояние металла. Дополнительная неравномерность напряжённого состояния возникает из-за того, что в зоне вершины калибра труба имеет плотный контакт с оправкой, а в зоне выпусков такой контакт отсутствует. Вследствие

разности линейных скоростей раската и оправки, последняя препятствует продольному течению металла на поверхности контакта. Вблизи контактной поверхности трубы и оправки возникают дополнительные растягивающие напряжения. В свою очередь в межклетевых промежутках к наружной поверхности раската внешних воздействий не приложено, и ничто не препятствует продольному течению металла. При этом внутренняя поверхность раската в зоне вершины калибра предыдущей клетки контактирует с оправкой, препятствующая продольному течению металла, что также вероятно приводит к появлению дополнительных растягивающих напряжений. В свою очередь дополнительные растягивающие напряжения приводят сначала к дополнительной пластической деформации, а затем к разрушению материала.

Вполне вероятно, что уменьшение величины овальности калибра приводит к увеличению угла охвата оправки внутренней поверхностью трубы, тогда, с учетом вышеизложенного, это может способствовать значительному снижению качества раскатываемых труб и стабильности протекания процесса раскатки в чистовых калибрах, в частности:

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

- при заполнении стана оправка будет препятствовать проталкиванию трубы через межклетевую промежуток и чем больше угол охвата оправки, тем это препятствие больше. В пределе труба может просто остановиться (рисунок 1а), если это толстостенная труба или собираться в гармошку (рисунок 1б), если это тонкостенная труба;

- при установившемся процессе прокатки возможны случаи образования поперечных разрывов (скворечников) и подрезов (рисунок 2б), образующихся в выпусках калибра (рисунок 2а).

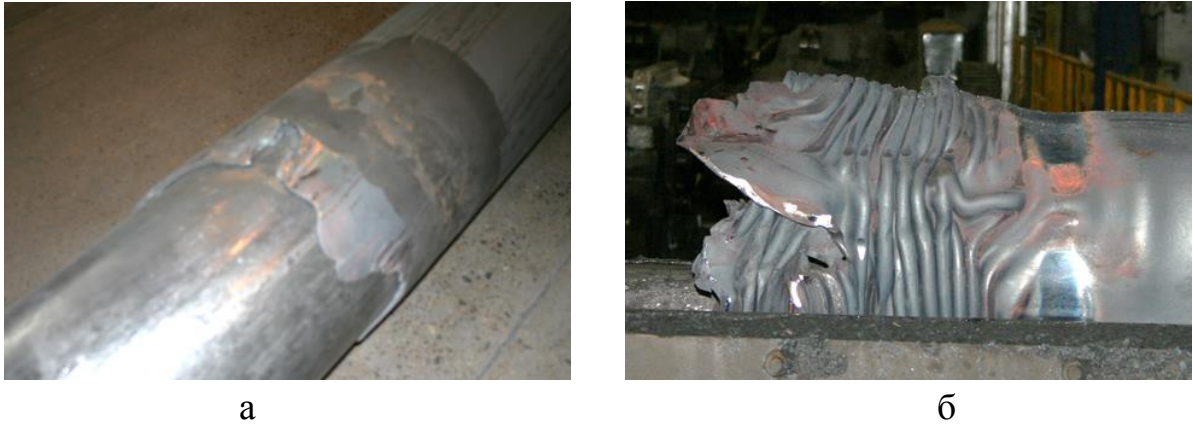


Рисунок 1 – Аварийные ситуации в 3-валковом раскатном стане:

а – оков оправки; б – образование гармошки в результате торможения раската в межклетевом промежутке

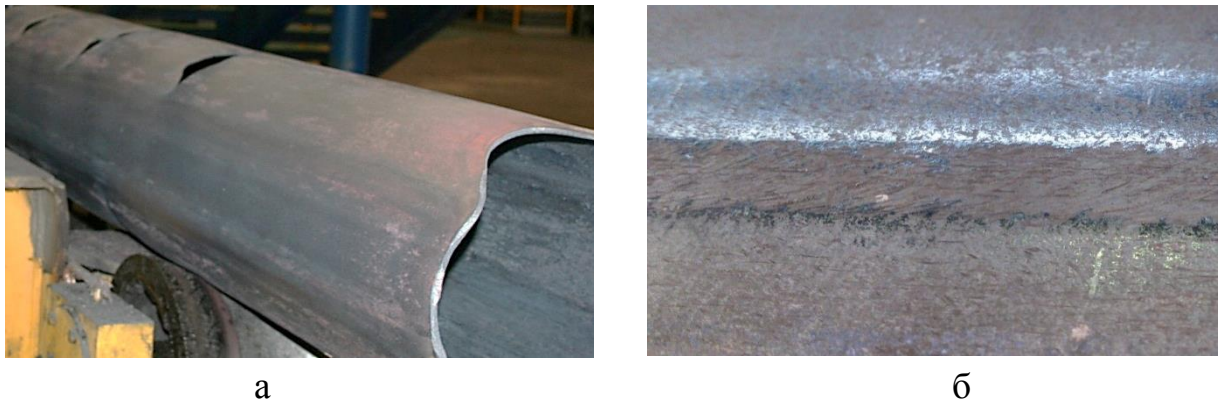


Рисунок 2 – Передельные трубы, раскатанные с использованием 3-валкового раскатного стана, имеющие по выпускам калибра: а – разрывы; б – подрезы

Таким образом, с целью повышения качества труб и стабильности протекания процесса раскатки необходимо определить условия, ограничивающие диапазон варьирования управляющих параметров процесса при:

- заполнении стана, в частности, осуществить анализ и ранжирование стадий осуществления захвата металла валками в чистовых калибрах с учетом воздействия на раскат оправки раскатного стана, величины овальности чистовых калибров, а также геометрических параметров раската в момент первичного касания с валками, при заполнении очага деформации и межклетевого промежутка.

- установившемся процессе раскатки и освобождении стана, в частности, осуществить анализ технологии раскатки труб в зависимости от заданной величины овальности чистовых калибров, как с точки зрения образования



поперечных разрывов и подрезов, образующихся в выпусках калибра, так и с точки зрения обеспечения беспрепятственного извлечения раската с оправки станом-извлекателем.

### 2.1.2.1 Разработка условий, ограничивающих процесс деформации металла при заполнении стана

С учетом вышеизложенного процесс захвата металла валками в чистовых калибрах следует ранжировать в соответствии с пятью стадиями, приведенными на рисунке 3.

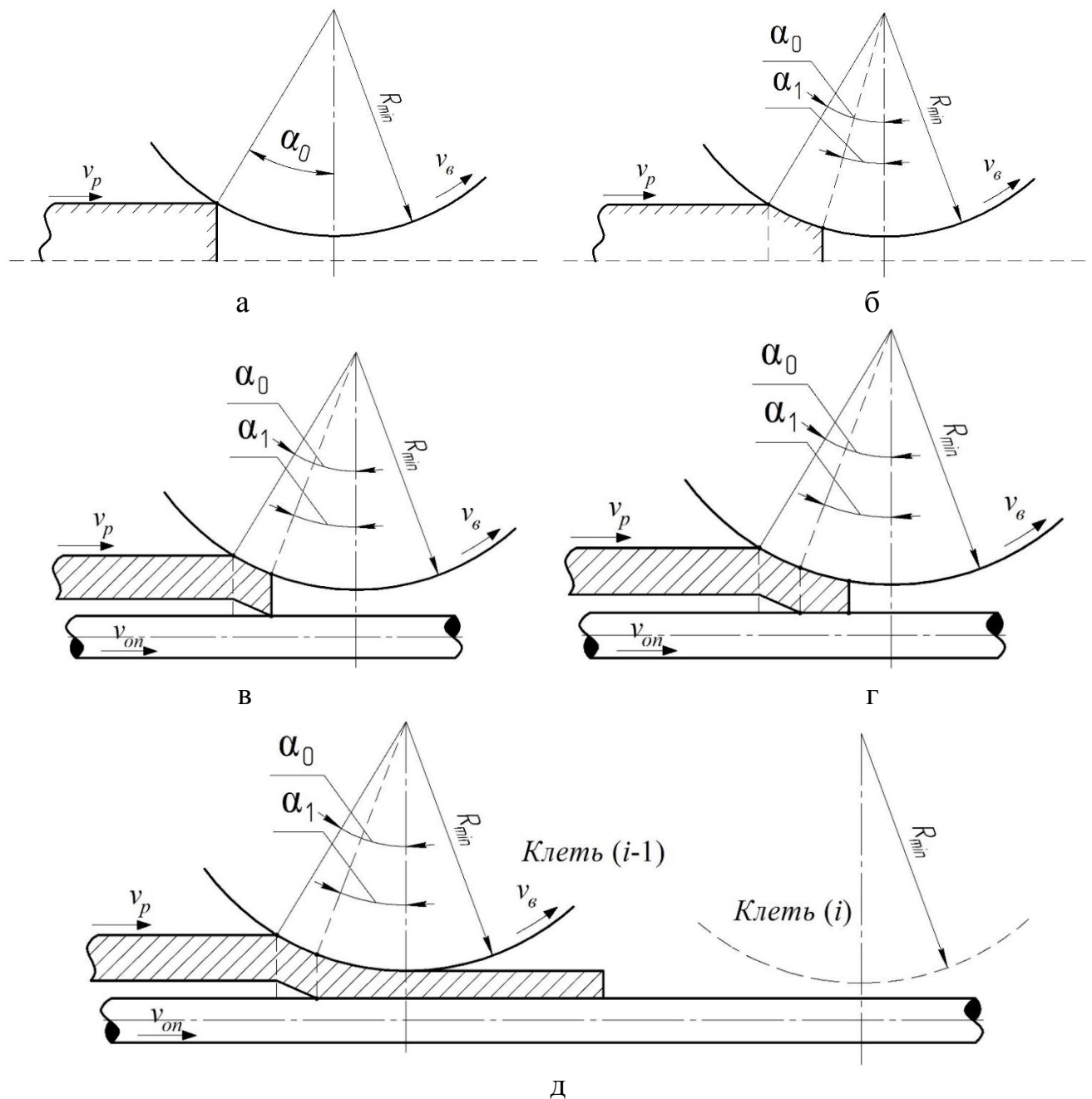


Рисунок 3 – Стадии захвата металла валками в чистовых калибрах

а) *касание валков – первичный захват*. Данная стадия захвата идентична процессам прокатки как сплошных, так и полых заготовок. Исключением является то, что при прокатке полых заготовок, после выхода раската из предшествующего чистовому калибра, форма переднего конца раската отлична от круглой, в частности наблюдается образование раструба (рисунок 4). Соответственно, при анализе условий первичного захвата раската валками в чистовых калибрах необходимо знать ширину раската и, следовательно, закономерности уширения.

б) *заполнение очага деформации при редуцировании диаметра*. На данной стадии захвата происходит уменьшение наружного и внутреннего диаметра раската и формируется поверхность контакта площадью  $F_k$  между валком и раскатом, приводящая к увеличению касательной силы трения и способствующей втягиванию раската в калибр. Данные условия также справедливы при прокатке как в калибровочных, так и редуцирующе-растяжных станах;

в) *касание оправки – вторичный захват*. После осуществления первичного захвата и по мере заполнения чистового калибра металлом равнодействующие всех сил на контактной поверхности смещаются в направлении прокатки, однако, как только раскат коснулся оправки, схема действия всех сил изменяется [114]. С учетом того, что скорость перемещения оправки в чистовых калибрах меньше скорости раската, силы трения между раскатом и оправкой будут препятствовать осуществлению вторичного захвата. Соответственно, стадия вторичного захвата является одной из определяющих стабильность протекания процесса раскати.

г) *заполнение очага деформации при редуцировании толщины стенки раската*. После осуществления вторичного захвата реализуется процесс заполнения очага деформации при одновременном обжатии толщины стенки раската. С учетом того, что обжатие толщины стенки в чистовых калибрах незначительны, в сравнении с черновой группой клетей, можно предположить, что процесс прокатки на стадии заполнения очага деформации будет осуществляться стабильно.

д) *заполнение межклетевого промежутка*. На выходе из очага деформации раскат охватывает оправку с максимальным углом. По мере продвижения раската

в межклетевом промежутке площадь контакта между внутренней поверхностью трубы и поверхности оправки будет увеличиваться. В результате чего, сил трения между валком и раскатом может оказаться недостаточно, что в итоге может привести к проскальзыванию валков и, соответственно, торможению раската в межклетевом промежутке. Соответственно, заполнение межклетевого промежутка является второй из основных стадий, определяющих стабильность протекания процесса раскатки в чистовых калибрах.

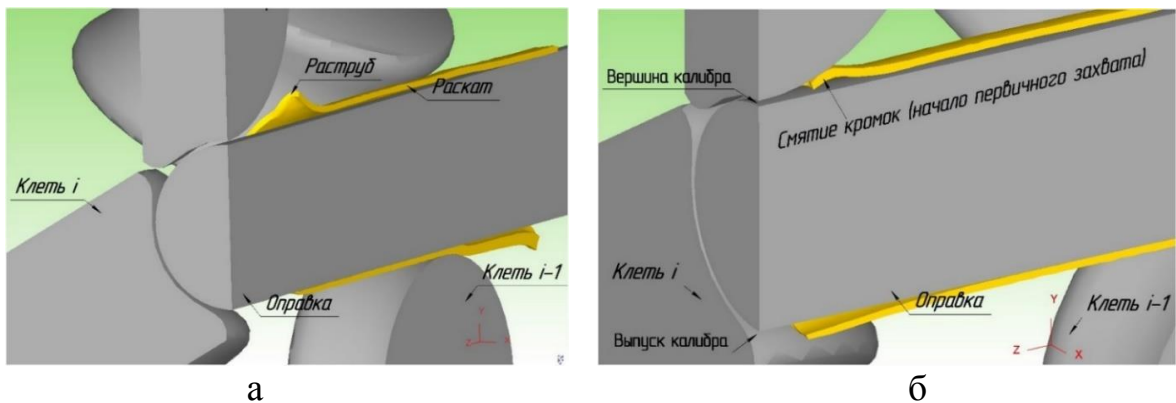


Рисунок 4 – Формирование переднего конца раската:

а – на выходе из предшествующего калибра, б – при первичном захвате

Таким образом, с целью обеспечения стабильности протекания процесса раскатки в чистовых калибрах, необходимо осуществить анализ и математическое описание условий на стадии:

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

В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 5, составим уравнение равновесия продольных сил, действующих на раскат в момент первичного захвата раската валками.

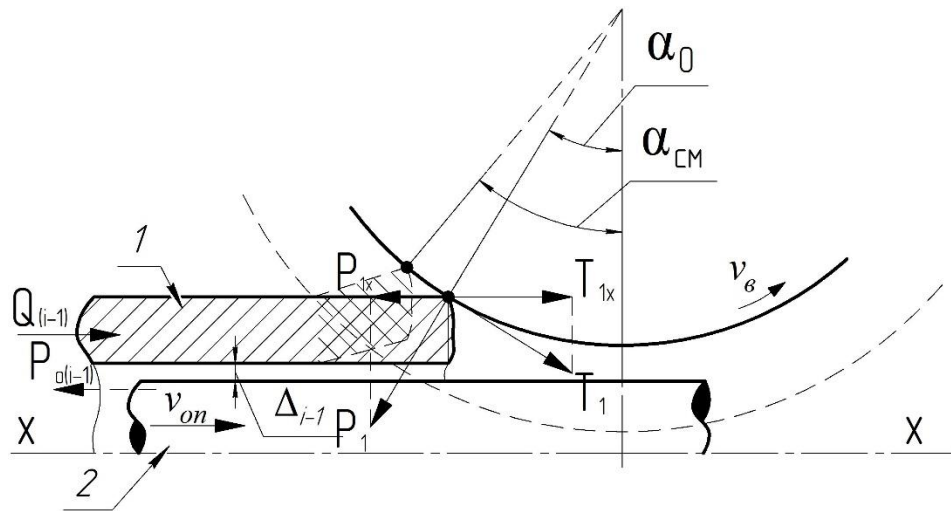


Рисунок 5 – Схема взаимодействия валка, раската и оправки при смятии кромок и первичном захвате в чистовых калибрах

Так как касательные силы трения, нормального давления, вталкивающая сила и осевое усилие со стороны предшествующей клетки оказывают одинаковое воздействие со стороны трех валков на раскат, запишем:

$$T_{ix} - P_{ix} + Q_{i-1} - P_{0(i-1)} = 0. \quad (5)$$

Ввиду малой степени деформации переднего торца раската в зоне редуцирования усилие прокатки будет небольшим и можно считать, что на контактной поверхности длиной  $l_1$  будет действовать закон Амонтона – Кулона, следовательно, касательная сила трения может быть определена [130-132]:

$$T = f_1 \cdot P, \quad (6)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения на контакте раската с валком.

В соответствии с рисунком 5 проекции силы нормального давления и касательной силы трения определяются в соответствии с формулами:

$$\begin{cases} P_{ix} = P_i \cdot \sin \alpha_0, \\ T_{ix} = T_i \cdot \cos \alpha_0. \end{cases} \quad (7)$$

С учетом формул (6) и (7) преобразуем уравнение (5):

$$f_1 \cdot P_i \cdot \cos \alpha_0 - P_i \cdot \sin \alpha_0 + Q - P_{0(i-1)} = 0. \quad (8)$$

Выразим  $f_1$ , предварительно разделив левую и правую части уравнения (8) на произведение величин  $P$  и  $\cos \alpha_0$ , и запишем условие в виде неравенства, характеризующего первичный захват в клетях с чистовыми калибрами:

$$f_1 \geq \operatorname{tg} \alpha_0 + \frac{1}{\cos \alpha_0} \left[ \frac{P_{0(i-1)} - Q}{P_i} \right]. \quad (9)$$

Анализируя полученную формулу можно отметить, что при осуществлении процесса раскатки сила  $Q$  со стороны предшествующей клетки будет превосходить по величине осевое усилие  $P_{0(i-1)}$ , направленное со стороны оправки ( $Q > P_{0(i-1)}$ ), следовательно, в неравенстве (9) разность в скобках будет иметь отрицательную величину, уменьшая тем самым всю правую часть неравенства, соответственно, улучшая условия первичного захвата. Приняв, в качестве допущения, разность в скобках бесконечно малой величиной, получаем известное из теории прокатки условие захвата [130]:

$$f_1 \geq \operatorname{tg} \alpha_0, \quad (10)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения на контакте раската с валком.

Тогда, ограничение может быть записано в виде условия:

$$g_1(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = f_1 - \operatorname{tg} \alpha_0 \geq 0. \quad (11)$$

Как было отмечено ранее при анализе условий первичного захвата раската валками в чистовых калибрах необходимо знать ширину раската и, следовательно, закономерности уширения. В соответствии с рисунком 6 половину ширины раската на входе в чистовой калибр можно определить по формуле:

$$B_{p(i-1)} = \Delta_{(i-1)} + S_{\text{вын}(i-1)} + R_{\text{он}}. \quad (12)$$

Однако, если величина  $R_{\text{он}}$  постоянная, то величины  $\Delta_{(i-1)}$  и  $S_{\text{вын}(i-1)}$  изменяются в зависимости от параметров процесса прокатки и возможно за счет изменения величины овальности калибра, а также коэффициента вытяжки в данном калибре.

Их численное изменение в зависимости от параметров процесса прокатки может быть определено на основании экспериментальных исследований, в частности, проведения физического моделирования.

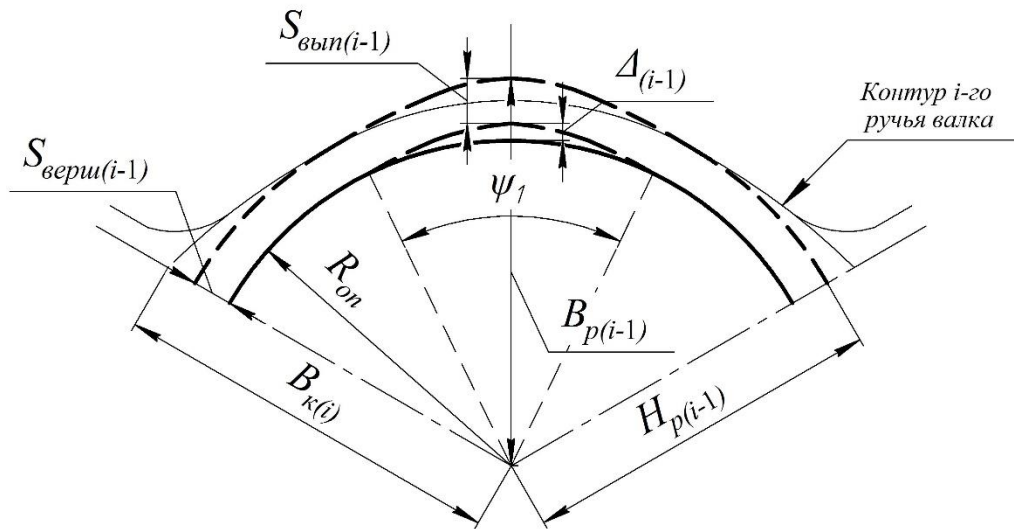


Рисунок 6 – Форма раската на входе в чистовой калибр

К началу вторичного захвата между валком и раскатом формируется поверхность контакта площадью  $F_k$ . На этой поверхности действует напряжение трения  $\tau$ , приводящее к появлению силы трения (рисунок 7):

$$T = \tau \cdot F_k, \quad (13)$$

где  $\tau$  – напряжение трения;

$F_k$  – площадь контактной поверхности.

Горизонтальная проекция этой силы способствует вторичному захвату. Также на этой поверхности действует контактное давление  $p$ . Со стороны оправки начинает действовать осевое усилие  $P_o$ , оказывающее отрицательное воздействие на условия вторичного захвата. С учетом действия сил, приведенных на рисунке 7, составим уравнение равновесия продольных сил, действующих на раскат в момент вторичного захвата:

$$T_{2x} - P_{2x} - P_o = 0. \quad (14)$$

Ввиду малой степени деформации переднего торца раската в зоне редуцирования касательная сила трения может быть определена в соответствии с формулой (6). По аналогии можно предположить, что сила трения на контактной

поверхности раската с оправкой также определяется законом трения Амонтона – Кулона, тогда:

$$P_o = k_1 \cdot f_2 \cdot P \cdot \cos \alpha_1, \quad (15)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий неплотное прилегание раската к оправке в момент вторичного захвата;

$f_2$  – коэффициент трения на контакте раската с оправкой.

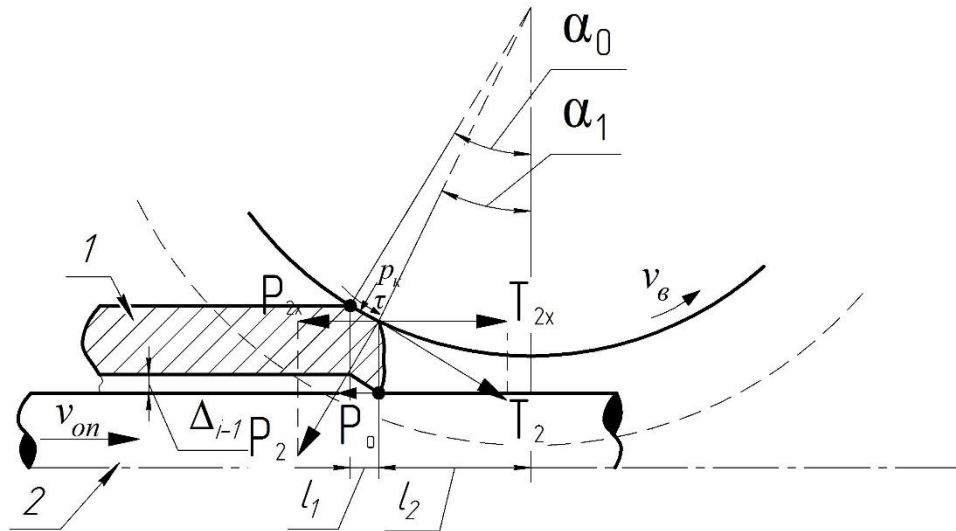


Рисунок 7 – Схема взаимодействия валка, раската и оправки при вторичном захвате в чистовых калибрах

При определении коэффициента  $k_1$  следует учитывать, что в момент вторичного захвата раскат охватывает оправку с суммарным углом  $\varphi_3 < \varphi$  величина которого определяется овальностью  $i$ -го калибра и величиной отрыва ( $\Delta_{(i-1)}$ )  $i$ -1-го калибра (рисунок 6). Коэффициент охвата оправки в момент вторичного захвата численно может быть определен по формуле:

$$k_1 = \frac{\varphi_3}{360}. \quad (16)$$

Преобразуем уравнение (14) с учетом формул (6), (7) и (15):

$$f_1 \cdot P \cdot \cos \alpha_1 - P \cdot \sin \alpha_1 - k_1 \cdot f_2 \cdot P \cdot \cos \alpha_1 = 0. \quad (17)$$

Разделим левую и правую части уравнения на произведение величин  $P$  и  $\cos \alpha_1$ :

$$f_1 - \operatorname{tg} \alpha_1 - k_1 \cdot f_2 = 0. \quad (18)$$

Далее запишем в виде неравенства, характеризующего условие вторичного захвата с учетом отрицательного воздействия оправки на раскат в чистовых калибрах:

$$f_1 \geq \operatorname{tg} \alpha_1 + k_1 \cdot f_2. \quad (19)$$

Окончательно, ограничение может быть записано в виде условия:

$$g_2(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = f_1 - \operatorname{tg} \alpha_1 - k_1 \cdot f_2 \geq 0. \quad (20)$$

При осуществлении вторичного захвата и по мере заполнения очага деформации металлом, раскат на выходе из очага деформации охватывает оправку с максимальным углом  $\varphi$ , где угол  $\varphi$  определяется величиной овальности калибра и параметрами процесса прокатки ( $D/S$ ,  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ). Условия заполнения очага деформации и межклетевого промежутка металлом определяются на основании расчета площади контактной поверхности валка и раската, а также раската и оправки (рисунок 8).

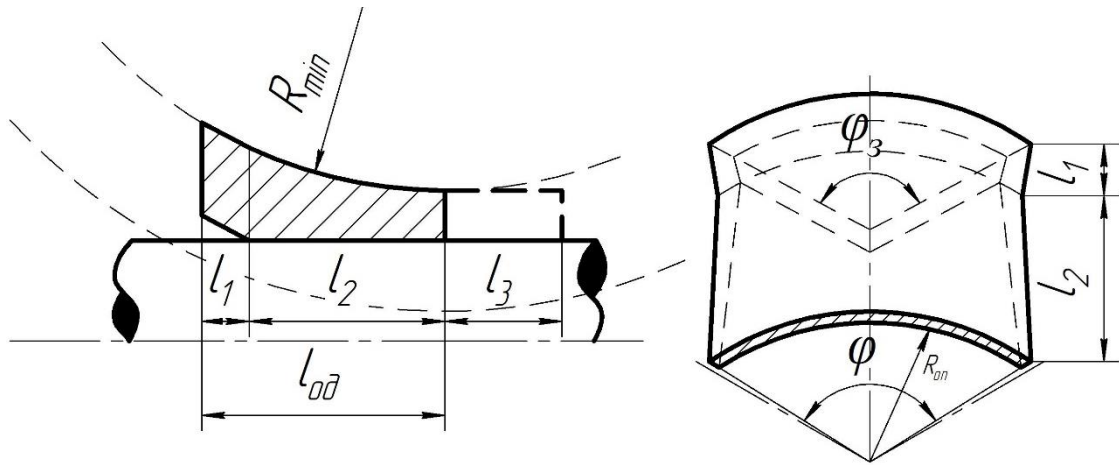


Рисунок 8 – К определению площади контактной поверхности в сечениях очага деформации: а – продольном; б – поперечном

Для определения условия заполнения очага деформации и межклетевого промежутка запишем уравнение:

$$f_1 \cdot p_k \cdot F_{кв} \cdot \cos \alpha_1 - p_k \cdot F_{кв} \cdot \sin \alpha_1 - k_2 \cdot f_2 \cdot p_k \cdot F_{ко} \cdot \cos \alpha_1 = 0. \quad (21)$$

где  $F_{кв}$  – площадь контактной поверхности между валком и раскатом;

$F_{ко}$  – площадь контактной поверхности между раскатом и оправкой.



Разделим левую и правую части уравнения на произведение величин  $p_k$  и  $\cos\alpha_1$  и преобразуем:

$$f_1 - \operatorname{tg} \alpha_1 = k_2 \cdot f_2 \cdot \frac{F_{\kappa o}}{F_{\kappa \phi}} = 0. \quad (22)$$

Коэффициент  $k_2$  определяется на основании фактической величины охвата оправки и рассчитывается по формуле:

$$k_2 = \varphi^{-1}. \quad (23)$$

Площадь контактной поверхности между раскатом и оправкой определяется в соответствии с формулой:

$$F_{\kappa o} = \frac{\pi \cdot R_{on} \cdot \varphi}{180} [l_2 + l_3]. \quad (24)$$

Следует отметить, что при определении условия заполнения очага деформации длина  $l_3$  (длина раската на выходе из очага деформации) принимается равной нулю. При определении условия заполнения межклетевого промежутка длина  $l_3$  принимается равной расстоянию между двумя смежными (предпоследней и последней) чистовыми клетями, либо расстоянию равному выдвигению оправки за последнюю клеть раскатного стана.

Площадь контактной поверхности между валком и раскатом определяется по формуле:

$$F_{\kappa \phi} = \frac{\pi}{180} \cdot 2R_{\min} \cdot \alpha_1 \cdot R_{\kappa} \cdot \varphi_3. \quad (25)$$

Таким образом, условие заполнения межклетевого промежутка запишется в виде:

$$f_1 \geq \operatorname{tg} \alpha_1 + k_2 \cdot f_2 \cdot \frac{R_{on} \varphi}{2R_{\min} \alpha_1 R_{\kappa} \varphi_3} \cdot [l_2 + l_3]. \quad (26)$$

Окончательно, ограничение может быть записано в виде условия:

$$g_3(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = f_1 - \operatorname{tg} \alpha_1 - k_2 \cdot f_2 \cdot \frac{R_{on} \varphi}{2R_{\min} \alpha_1 R_{\kappa} \varphi_3} \cdot [l_2 + l_3] \geq 0. \quad (27)$$

Для определения углов первичного и вторичного захвата, а также соответствующих им длин контактных поверхностей в соответствии с особенностями формирования толщины стенки раската в чистовых калибрах, воспользуемся схемой, приведенной на рисунке 9.

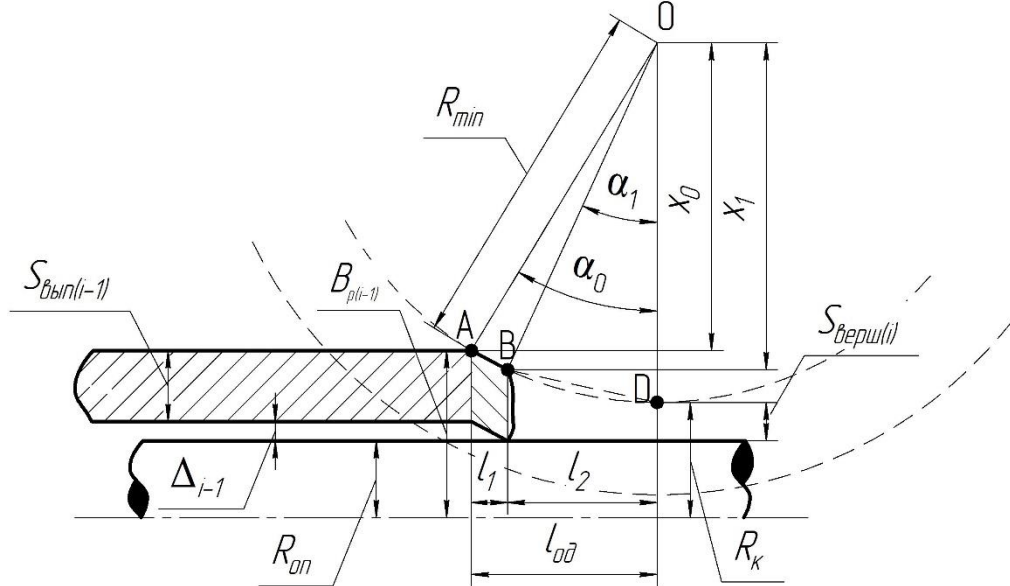


Рисунок 9 – Схема определения углов захвата

В общем виде угол первичного и вторичного захвата определяется в соответствии с формулой:

$$\cos \alpha_i = \frac{x_i}{R_{\min}}. \quad (28)$$

Величина  $x_0$ , характеризующая угол первичного захвата может быть определена по формуле:

$$x_0 = R_{\min} - (S_{\text{вып}(i-1)} + \Delta_{i-1} - R_k + R_{\text{он}}) = R_{\min} - (B_{p(i-1)} - R_{\text{он}} - S_{\text{верш}(i)}). \quad (29)$$

Величина  $x_1$ , характеризующая угол вторичного захвата, определяется по формуле:

$$x_1 = R_{\min} - (S_{\text{вып}(i-1)} - S_{\text{верш}(i)}). \quad (30)$$

Тогда угол первичного захвата определяется в соответствии с формулой:

$$\alpha_0 = \arccos \left[ 1 - \frac{B_{p(i-1)} - R_{\text{он}} - S_{\text{верш}(i)}}{R_{\min}} \right]. \quad (31)$$

Угол вторичного захвата определяется в соответствии с формулой:

$$\alpha_1 = \arccos \left[ 1 - \frac{S_{вын(i-1)} - S_{верт(i)}}{R_{\min}} \right]. \quad (32)$$

Для определения длины зоны редуцирования  $l_1$  при первичном захвате рассмотрим  $\triangle AOB$ , в котором сторона  $AB$  – искомая. На основании теоремы синусов запишем соотношение:

$$\frac{AB}{\sin(\alpha_0 - \alpha_1)} = \frac{R_{\min}}{\sin \left[ \frac{180 - (\alpha_0 - \alpha_1)}{2} \right]}. \quad (33)$$

Выразим искомую сторону  $AB$  из равенства (32), предварительно преобразовав его:

$$AB = \frac{R_{\min} \cdot \sin[\alpha_0 - \alpha_1]}{\cos[0,5(\alpha_0 - \alpha_1)]}. \quad (34)$$

Для определения длины зоны обжатия толщины стенки  $l_2$  при вторичном захвате рассмотрим  $\triangle BOD$ , в котором сторона  $BD$  – искомая. В соответствии с формулой (33), запишем:

$$\frac{BD}{\sin[\alpha_1]} = \frac{R_{\min}}{\sin \left[ \frac{180 - \alpha_1}{2} \right]}. \quad (35)$$

Выразим искомую сторону  $BD$  из равенства (35), предварительно преобразовав его:

$$BD = \frac{R_{\min} \cdot \sin[\alpha_1]}{\cos[0,5\alpha_1]}. \quad (36)$$

Тогда длина зоны редуцирования  $l_1$  при осуществлении первичного захвата определяется в соответствии с формулой:

$$l_1 = \sqrt{\left[ \frac{R_{\min} \cdot \sin[\alpha_0 - \alpha_1]}{\cos[0,5(\alpha_0 - \alpha_1)]} \right]^2 - [B_{p(i-1)} - S_{вын(i-1)} - R_{on}]^2}. \quad (37)$$

Длина зоны обжатия толщины стенки  $l_2$  при осуществлении вторичного захвата определяется в соответствии с формулой:

$$l_2 = \sqrt{\left[ \frac{R_{\min} \cdot \sin \alpha_1}{\cos[0,5\alpha_1]} \right]^2 - [S_{\text{выт}(i-1)} - S_{\text{верш}(i)}]^2} . \quad (38)$$

### 2.1.2.2 Разработка условий, ограничивающих процесс деформации металла при установившемся процессе и освобождении стана

При разработке условий, ограничивающих процесс деформации металла в чистовых калибрах при установившемся процессе прокатки и освобождении стана необходимо провести физическое моделирование с целью определения:

- предельной величины овальности и угла охвата оправки, при которых деформация раската осуществляется без разрушения материала и наличия дефектов поверхности, в частности образования поперечных разрывов и подрезов, образующихся в выпусках калибра;

- характера формоизменения раската в чистовых калибрах, в частности, исследование угла охвата оправки, уширения раската и изменения толщины стенки в выпусках калибра в зависимости от величины овальности калибра  $\Theta$  и параметров процесса прокатки ( $D/S$ ,  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ).

#### Применяемое оборудование и материалы

Физическое моделирование проведено на лабораторном прокатном стане, имеющем клеть с 3-валковым калибром.

В качестве модельного материала образцов, имитирующего прокатку нагретой стали, использовался свинец марки С1 [133].

#### Средства измерения

Для определения угла охвата оправки, площади поперечного сечения и толщины стенки раската в выпусках калибра, проводилось сканирование поперечного сечения раската и последующая его обработка с использованием приложения Компас-2D (рисунок 10). Коэффициент вытяжки определялся по

общеизвестной формуле отношения площадей поперечного сечения патрубка до и после деформации [88, 134].

Площадь разрыва определялась путем сканирования плоского образца, предварительно вырезанного из патрубка (рисунок 11а). Полученное изображение высокой четкости обрабатывалось также с использованием приложения Компас-2D (рисунок 11б).

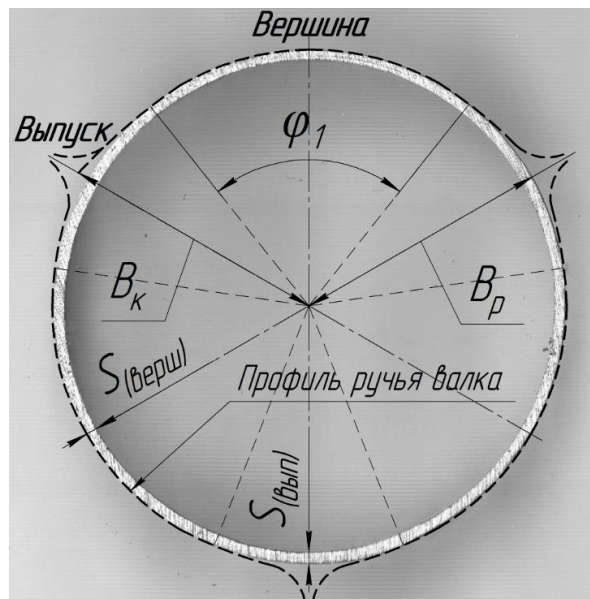


Рисунок 10 – Исследование поперечного сечения раскатанного патрубка в приложении Компас-2D

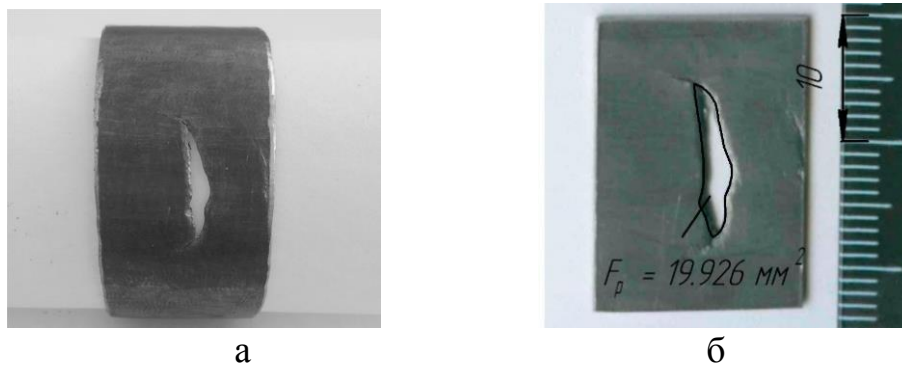


Рисунок 11 – К определению площади разрыва:

а – сечение патрубка с разрывом; б – скан плоского образца

### Условия проведения эксперимента

Свинцовые полые заготовки, полученные путем расточки на токарном станке, последовательно раскатывали в двух проходах, овальность калибров в которых уменьшали с величины 1,09 до 1,03 с шагом 0,03. В эксперименте использовались

оправки трех диаметров. С целью получения подката для чистовых калибров, исходная заготовка наружным диаметром 41,2 мм с толщиной стенки 2,6 мм раскатывалась в трех черновых калибрах, выполненных с овальной обжимной зоной и выпусками по радиусу. Геометрические параметры подката для чистовых калибров приведены на рисунке 11. Следует отметить, что радиус обжимной зоны чистового калибра и радиус оправки были концентричны. Перед первым проходом на оправку наносилась графитовая смазка. После каждого прохода, для всех вариантов моделирования, осуществлялась обрезка некондиционного переднего и заднего концов раската.

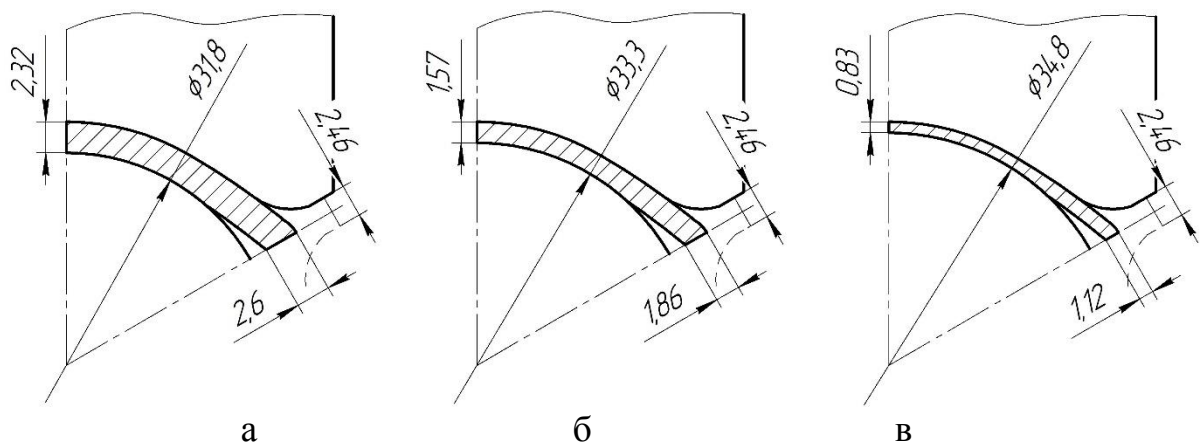


Рисунок 11 – Геометрические параметры подката для чистовых калибров, при прокатке на оправках диаметром: а – 31,8 мм; б – 33,3 мм; в – 34,8 мм

Эксперимент проведен с тройной кратностью повторения опытов. В эксперименте использовалось 27 образцов. Раскатка патрубков осуществлялась при частоте вращения валков равной 5 об/мин. Величина зазора между валками не изменялась в процессе всего эксперимента.

Параметры исходной заготовки, подката и готового раската представлены в таблице 1, параметры калибровки валков чистовых калибров, в таблице 2.

Таблица 1 – Исходные данные

№ Вар.	Диаметр оправки $D_{on}$ , мм	Параметры заготовки			Параметры подката			Параметры готового раската		
		$D_3$ , мм	$S_3$ , мм	$D/S$	$D_{nd}$ , мм	$S_{nd}$ , мм	$D/S$	$D_p$ , мм	$S_p$ , мм	$D/S$
1.	31,8	41,2	2,6	15,85	38,1	2,6	14,7	36,3	2,16	16,8

окончание таблицы 1

2.	33,3	41,2	2,6	15,85	38,1	1,86	20,5	36,3	1,47	24,7
3.	34,8					1,12	34,0		0,78	46,5

Таблица 2 – Параметры калибровки валков чистовых калибров, мм

Номер чистового калибра (прохода)		1-2	1-2	1-2
Величина овальности калибра		1,09	1,06	1,03
Координаты центра радиуса галтели R5	$x_{c5}$	16,6801	16,3452	16,1136
	$y_{c5}$	13,6458	13,6063	13,4726
Координаты центра радиуса выпуска R2	$x_{c2}$	-13,7143	-6,4379	-2,2769
	$y_{c2}$	-23,8734	-11,2704	-4,0633
Координаты центра радиуса обжимной зоны R1	$x_{c1}$	0,00	0,00	0,00
	$y_{c1}$	0,00	0,00	0,00
Эксцентриситет		$E$	0,00	0,00
Радиус галтели		$R_5$	2,5714	2,5714
Радиус выпуска		$R_2$	45,7143	31,1616
Радиус обжимной зоны		$R_1$	18,165	18,165
Угол сопряжения		$\alpha_5$	38,00	38,72
Угол выпуска		$\alpha_1$	60,00	60,00
Межвалковый зазор		$W$	2,08	2,08
Ширина валка		$L$	40,00	40,00
Диаметр калибра		$D_k$	36,33	36,33
Диаметр по дну валка		$D_{об}$	134,27	134,27
Идеальный диаметр валка		$D_u$	170,60	170,60

### Результаты эксперимента

При раскатке патрубков в калибре с величиной овальности 1,09 и параметром тонкостенности ( $D/S$ ) равным: 16,8, 24,7 и 46,5, соответствующих вариантам моделирования 1-3, приведенных в таблице 1, деформация в первом и втором проходах осуществлялась без разрушения материала. Дефектов поверхности раската в виде разрывов и подрезов не наблюдалось. Аналогичные результаты были получены для всех вариантов моделирования при раскатке патрубков с использованием чистовых калибров с величиной овальности 1,06.

При использовании чистовых калибров с величиной овальности 1,03, при раскатке патрубков с  $D/S$  равным 16,8, деформация в первом и втором проходах

осуществлялась также без разрушения материала (рисунок 12а). При раскатке патрубка с  $D/S$  равным 24,7 в первом проходе зафиксировано единичное разрушение материала, локализирующееся в выпуске калибра (рисунок 12б).



а



б



в

Рисунок 12 – Патрубок после первого прохода, раскатанный в калибре с величиной овальности 1,03 при  $D/S$ : а – 16,8; б – 24,7; в – 46,5

Дальнейшее исследование позволило установить, что при раскатке патрубков с параметром тонкостенности ( $D/S$ ) равным 46,5, дефекты в виде поперечных разрывов, образующихся в выпусках калибра (рисунок 12в) имеют большее раскрытие и их количество достигает от 2 до 4 штук на каждом раскатываемом патрубке. Это происходит вследствие неравномерности деформации раската по длине очага деформации. В частности, при увеличении относительного обжатия и степени тонкостенности патрубков увеличивается и продольное течение металла в



зоне вершины калибра, при этом в зоне выпусков скорость течения металла минимальна. С учетом того, что раскат охватывает оправку с максимальным углом, препятствующей продольному течению металла это приводит к появлению дополнительных растягивающих напряжений. В свою очередь дополнительные растягивающие напряжения приводят сначала к дополнительной пластической деформации, а затем к разрушению материала.

После второго прохода при прокатке в калибре с величиной овальности 1,03 и D/S патрубка равном 16,8, а также с величиной овальности 1,06 и D/S патрубка равном 24,7 наблюдались дефекты наружной поверхности раската в виде подрезов, образующихся в выпусках калибра (рисунок 13).

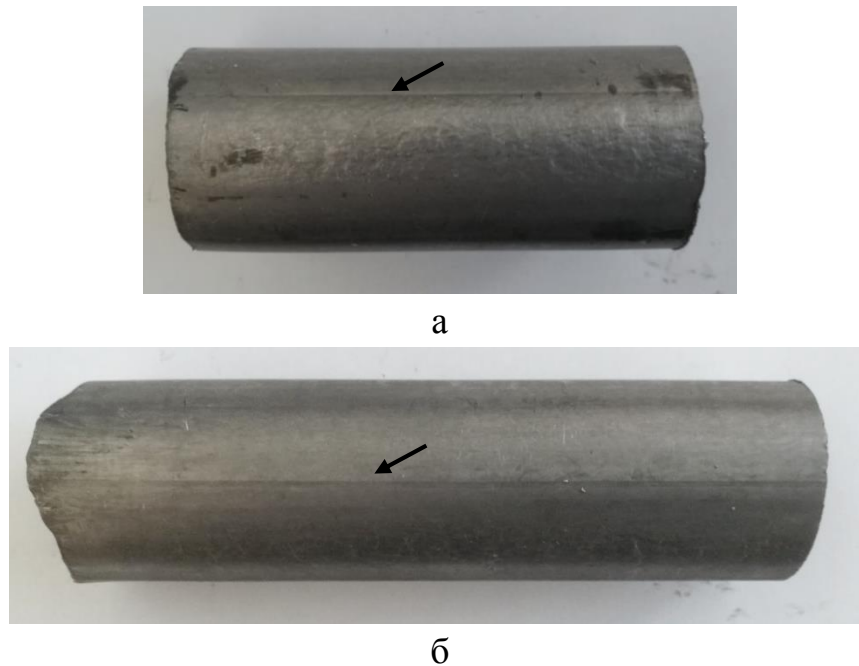


Рисунок 13 – Патрубок после второго прохода, раскатанный в калибре с величиной овальности: а – 1,03 при D/S=16,8; б – 1,06 при D/S=24,7

Образование данных дефектов обусловлено чрезмерным затеканием металла в выпуски калибра, вследствие того, что при данных условиях уширение раската превосходит по величине ширину калибра определяемой его овальностью. В результате, это в значительной степени снижает качество раскатываемых труб и способствует увеличению угла охвата оправки (таблица 3), что в конечном итоге ухудшает условия извлечения раската с оправки станом-извлекателем.

Таблица 3 – Результаты физического моделирования

№ Прохода	№ Патрубка	Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм	Толщина стенки на выходе, мм	Обжатие стенки в вершине калибра	Угол охвата оправки, град., при величине овальности калибра:			Коэффициент вытяжки, при величине овальности калибра:		
						<u>1,09</u>	<u>1,06</u>	<u>1,03</u>	<u>1,09</u>	<u>1,06</u>	<u>1,03</u>
1	1	34,8	1,12	0,78	0,3036	223,6	238,1	266,5	1,170	1,172	1,183
	2	34,8	1,12	0,78	0,3036	223,8	240,3	264,6	1,170	1,173	1,183
	3	34,8	1,12	0,78	0,3036	224,2	240,4	267,8	1,170	1,173	1,185
	1	33,3	1,86	1,52	0,1828	229,1	248,7	284,8	1,079	1,080	1,081
	2	33,3	1,86	1,52	0,1828	228,9	250,4	286,6	1,079	1,082	1,090
	3	33,3	1,86	1,52	0,1828	230,1	248,3	284,5	1,077	1,081	1,081
	1	31,8	2,61	2,27	0,1303	230,6	254,8	296,6	1,047	1,049	1,058
	2	31,8	2,61	2,27	0,1303	232,3	253,3	298,8	1,047	1,050	1,052
	3	31,8	2,61	2,27	0,1303	231,9	254,7	296,5	1,047	1,048	1,058
2	1	34,8	0,83	0,78	0,0602	207,2	220,9	243,8	1,020	1,024	1,027
	2	34,8	0,83	0,78	0,0602	205,8	221,8	243,6	1,019	1,024	1,029
	3	34,8	0,83	0,78	0,0602	211,5	220,5	244,9	1,020	1,026	1,027
	1	33,3	1,57	1,52	0,0318	213,6	236,3	268,7	1,007	1,010	1,012
	2	33,3	1,57	1,52	0,0318	213,2	235,6	270,01	1,008	1,009	1,012
	3	33,3	1,57	1,52	0,0318	214,1	236,4	268,2	1,008	1,010	1,012
	1	31,8	2,32	2,27	0,0216	216,7	243,3	282,1	1,004	1,006	1,008
	2	31,8	2,32	2,27	0,0216	215,4	244,1	283,2	1,005	1,007	1,009
	3	31,8	2,32	2,27	0,0216	216,5	245,9	282,7	1,004	1,007	1,009

### Обработка результатов эксперимента

На основании полученных результатов, приведенных на рисунках 12, 13 и сводной таблице 3, необходимо отметить следующее:

- при снижении величины овальности калибра и параметра тонкостенности раскатываемых патрубков угол охвата оправки, при прочих равных условиях, возрастает (таблица 3). Увеличение угла охвата оправки обусловлено меньшим уширением раската во внеконтактной зоне калибра, что также является следствием меньшего обжатия толщины стенки в вершине калибра;

- при прокатке в предпоследнем чистовом калибре с величиной овальности 1,03 и при относительном обжатии толщины стенки более 0,18 наблюдается формирование поперечных разрывов, образующиеся в выпусках калибра, причем площадь разрыва возрастает с увеличением параметра тонкостенности раската (рисунок 14).

- при прокатке в последнем чистовом калибре с величиной овальности менее 1,06, отношением  $D/S$  патрубка менее 24,7 и относительном обжатии менее 0,0602 наблюдаются дефекты наружной поверхности раската в виде подрезов, образующихся в выпусках калибра.

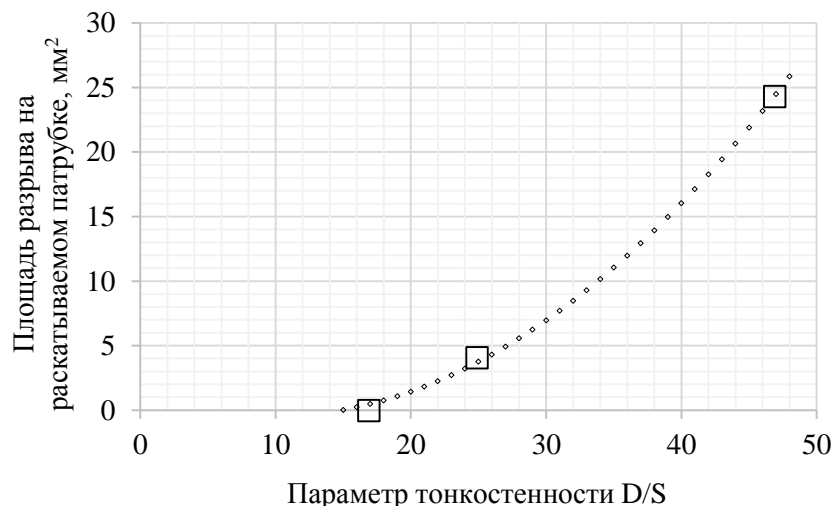


Рисунок 14 – Формирование поперечных разрывов на патрубке в зависимости от параметра тонкостенности  $D/S$

Обработка результатов физического моделирования осуществлена в 3 этапа, заключающихся в определении:

- 1) предельной величины овальности калибра и параметров процесса прокатки, при достижении которых наблюдается разрушение материала;
- 2) закономерностей уширения раската в зависимости от величины овальности калибра и параметров процесса прокатки;
- 3) закономерностей изменения толщины стенки раската в выпусках калибра в зависимости от величины овальности калибра и параметров процесса прокатки.

На первом этапе определено изменение угла охвата оправки в зависимости от величины овальности калибра, степени обжатия и параметра тонкостенности раската. Результаты представлены на рисунке 15.

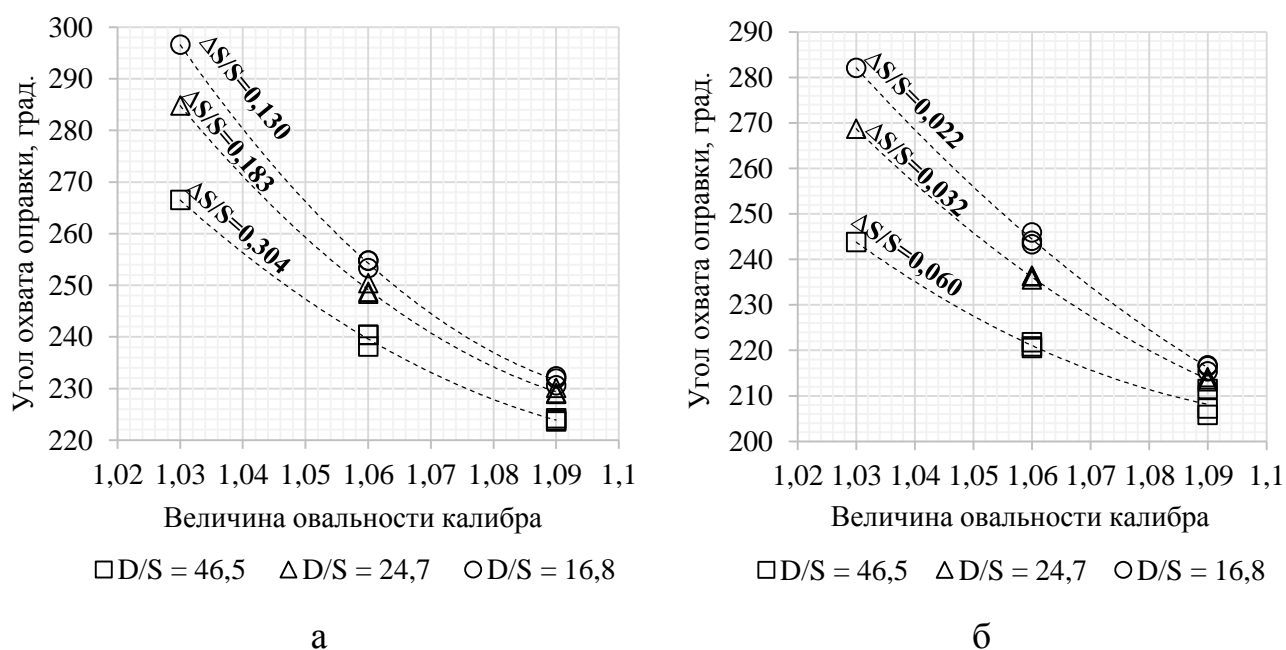


Рисунок 15 – Изменение угла охвата оправки ( $\varphi$ ) в зависимости от величины овальности калибра, степени обжатия и параметра тонкостенности после:

а – первого прохода; б – второго прохода

Аппроксимация результатов выполнена по методу наименьших квадратов, реализуемого в программе построения трендов MS Excel, на основании которого определена формула для расчета угла охвата оправки, учитывающая изменение

величины овальности калибра и взаимосвязь параметров процесса раскатки после первого и второго проходов:

$$\varphi = 569,9 \cdot \Theta_i^{-7,147} \cdot k_\varphi^{0,4115-0,3433 \cdot \Theta_i}, \quad (39)$$

где  $\Theta_i$  – величина овальности  $i$ -го калибра;

$k_\varphi$  – коэффициент, учитывающий изменение угла охвата оправки и взаимосвязь параметров процесса прокатки после первого и второго проходов.

Величина  $k_\varphi$  в формуле (39) численно определяется на основании выражения:

$$k_\varphi = \left[ 1 - \frac{S_{\text{верш}}(i)}{S_{\text{вып}}(i-1)} \right] \cdot \left[ \frac{1}{D/S \cdot \mu_i} \right]^2, \quad (40)$$

где  $S_{\text{верш}}(i)$  – толщина стенки в вершине  $i$ -го калибра, мм;

$S_{\text{вып}}(i-1)$  – толщина стенки в выпуске  $i-1$ -го калибра, мм;

$D/S$  – параметр тонкостенности раската;

$\mu_i$  – коэффициент вытяжки в  $i$ -ом калибре.

Графики изменения угла охвата оправки в зависимости от коэффициента  $k_\varphi$  для исследуемых величин овальности калибров представлены на рисунке 16.

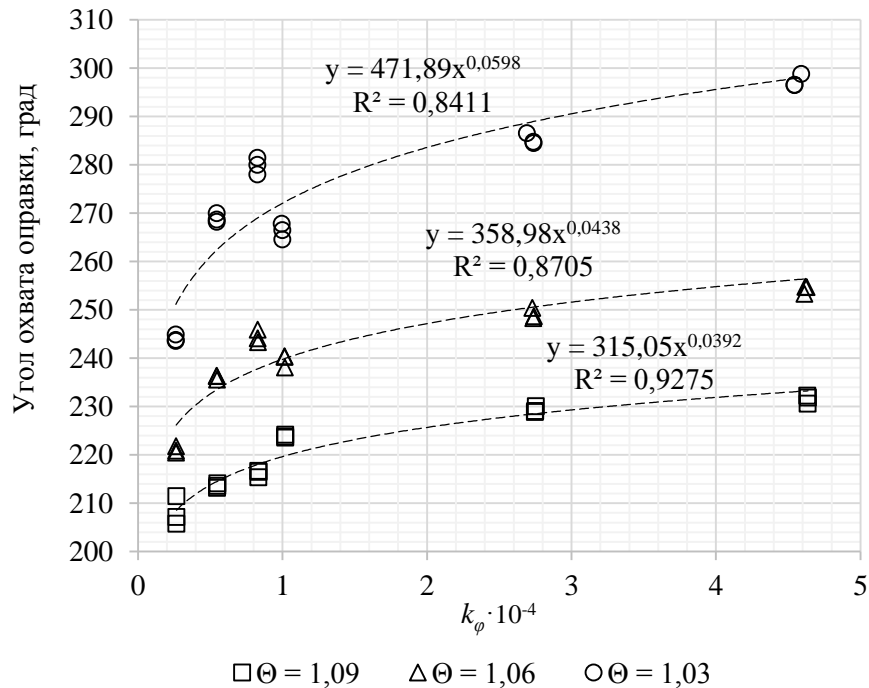


Рисунок 16 – Изменение угла охвата оправки в зависимости от коэффициента  $k_\varphi$

Численное сопоставление результатов расчета угла охвата оправки по формуле (39) с фактическими данными физического моделирования, усредненных относительно трех раскатанных патрубков для каждого прохода, в соответствии с таблицей 4, показывает высокую степень сходимости. Погрешность результатов расчета, приведенная в таблице 6, не превышает 5 %. Таким образом, разработанная формула позволяет численно оценить угол охвата оправки, являющимся одним из параметров системы ограничений процесса раскатки в чистовых калибрах.

Таблица 4 – Сравнительные результаты

№ Прохода	Диаметр оправки, мм	Угол охвата оправки ( $\varphi$ ), град								
		$\Theta = 1,09$			$\Theta = 1,06$			$\Theta = 1,03$		
		Факт	Расчет	$\Delta\%$	Факт	Расчет	$\Delta\%$	Факт	Расчет	$\Delta\%$
1	34,8	223,8	218,5	2,37	239,6	242,6	1,24	266,3	270,9	1,74
	33,3	229,3	226,7	1,13	249,1	254,3	2,08	285,3	286,9	0,57
	31,8	231,6	231,2	0,18	254,2	260,7	2,56	297,3	295,8	0,52
2	34,8	208,1	207,8	0,14	221,1	227,5	2,90	244,1	250,6	2,65
	33,3	213,6	213,5	0,05	236,1	235,5	0,24	268,9	261,4	2,80
	31,8	216,2	216,8	0,30	244,4	240,3	1,69	282,6	269,8	4,54

По результатам эксперимента было отмечено, что при отношении D/S раската равном 46,5 и 24,7 (рисунок 12 б, в), при прокатке в калибре с величиной овальности 1,03, по телу раската наблюдаются дефекты в виде поперечных разрывов, при этом отмечена повторяемость результатов на каждом раскатываемом патрубке. В то же время, результаты, приведенные на рисунках 12, 16 свидетельствуют о том, что разрушение материала происходит при определенных сочетаниях коэффициента  $k_\varphi$  и углов охвата оправки. Следовательно, предельную величину овальности калибра, соответственно и величину угла охвата оправки в зависимости от параметра тонкостенности раскатываемых труб, можно определить на основании графоаналитического анализа. Для этого были построены графики изменения угла охвата оправки и коэффициента  $k_\varphi$  для D/S равных 46,5 и 24,7 в соответствии с параметрами, приведенными в таблице 3. Следует отметить, что учитывались только те параметры, при которых были зафиксированы дефекты в виде поперечных разрывов. Результаты представлены на рисунке 17. Анализируя

полученные результаты, следует, что условия, при которых наступает разрушение материала определяются овальностью калибра, параметром тонкостенности раската и углом охвата оправки.

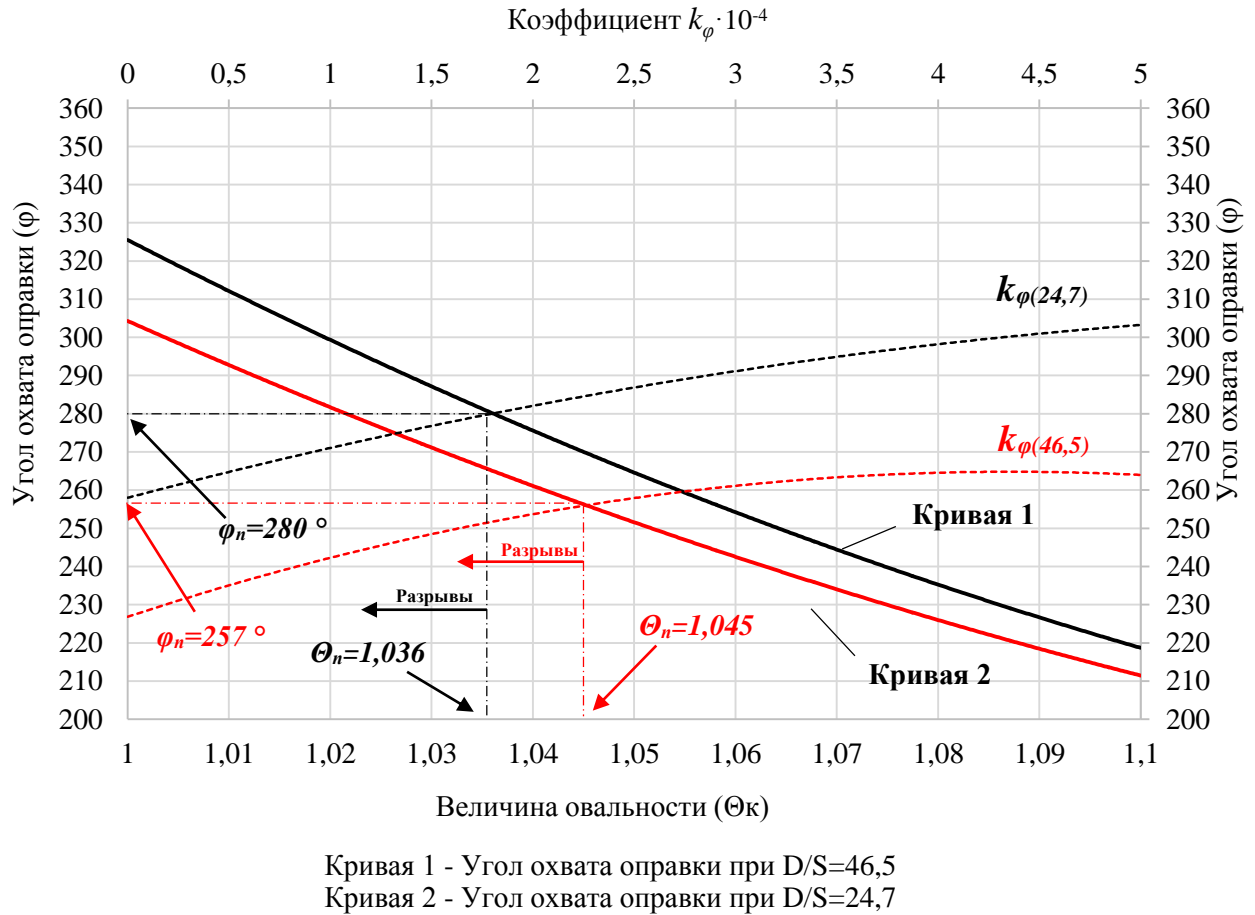


Рисунок 17 – Предельная величина овальности и угол охвата оправки в чистовых калибрах

Таким образом, с целью минимизации рисков образования дефектов в виде поперечных разрывов, образующихся в выпусках калибра, при получении передельных труб с параметром тонкостенности ( $D/S$ ) равным 46,5, прокатку в чистовых калибрах непрерывных раскатных станах с 3-валковыми клетями следует осуществлять с величиной овальности не менее 1,045, а при  $D/S$  равным 24,7 – не менее 1,035.

Граничные условия предельной величины овальности в чистовых калибрах в зависимости от параметра тонкостенности раскатываемых передельных труб,

обеспечивающих стабильное протекание процесса раскатки представлены на рисунке 18.

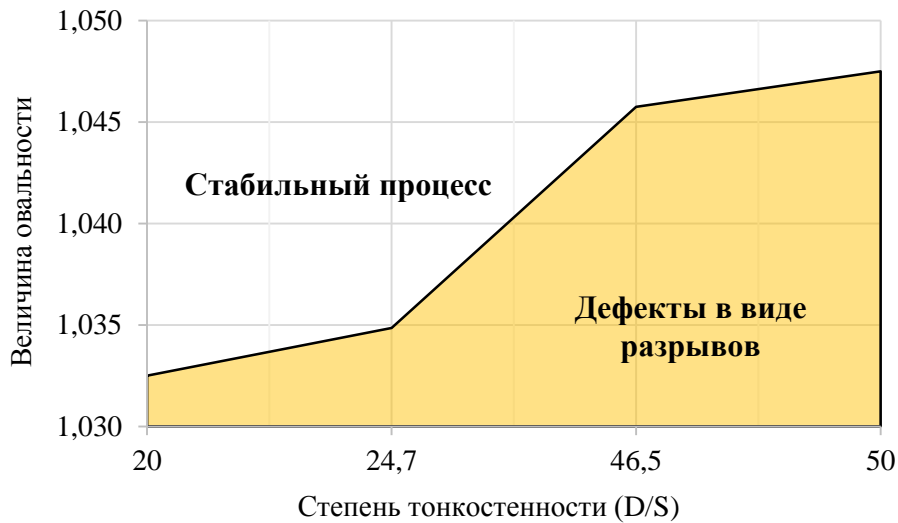


Рисунок 18 – Граничные условия по величине овальности чистовых калибров

Результаты проведенного исследования позволили установить граничные условия, регламентирующие снижение величины овальности в чистовых калибрах для раскатываемых труб с отношением D/S не более 50, обеспечивающие деформацию раската без разрушения материала:

$$\begin{cases} g_4(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = \Theta - \Theta_n = \Theta - 0,0004 \frac{D}{S} - 1,0258 > 0, \\ g_5(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = \varphi_n - \varphi = 306,06 - 1,055 \frac{D}{S} - \varphi > 0, \\ 9,98 \cdot 10^{-5} \leq k_\varphi \leq 27,98 \cdot 10^{-5}. \end{cases} \quad (41)$$

Прокатку в последнем чистовом калибре, при достижении относительного обжатия до 0,06, следует осуществлять при угле охвата оправки не более  $220^\circ$ . При большем значении угла охвата оправки возможны случаи возникновения дефектов в виде подрезов на наружной поверхности, а также затруднительное извлечение раската с оправки:

$$g_6(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = 220 - \varphi_i > 0, \quad (42)$$

где  $\varphi_i$  – фактический угол охвата оправки в последнем чистовом калибре



На втором этапе проведено исследование закономерностей уширения раската в зависимости от величины овальности калибра и параметров процесса прокатки. Для анализа величины уширения раската расчет осуществлялся в соответствии с формулой:

$$\Delta_B = \frac{B_{p(i)}}{H_{p(i-1)}} - 1, \quad (43)$$

где  $B_{pi}$  – половина ширины раската в  $i$ -ом калибре;

$H_{pi-1}$  – половина высоты раската предшествующего калибра.

Полученные результаты усреднялись относительно трех раскатанных патрубков для каждого прохода. Результаты изменения величины уширения раската после первого и второго проходов представлены на рисунке 19.

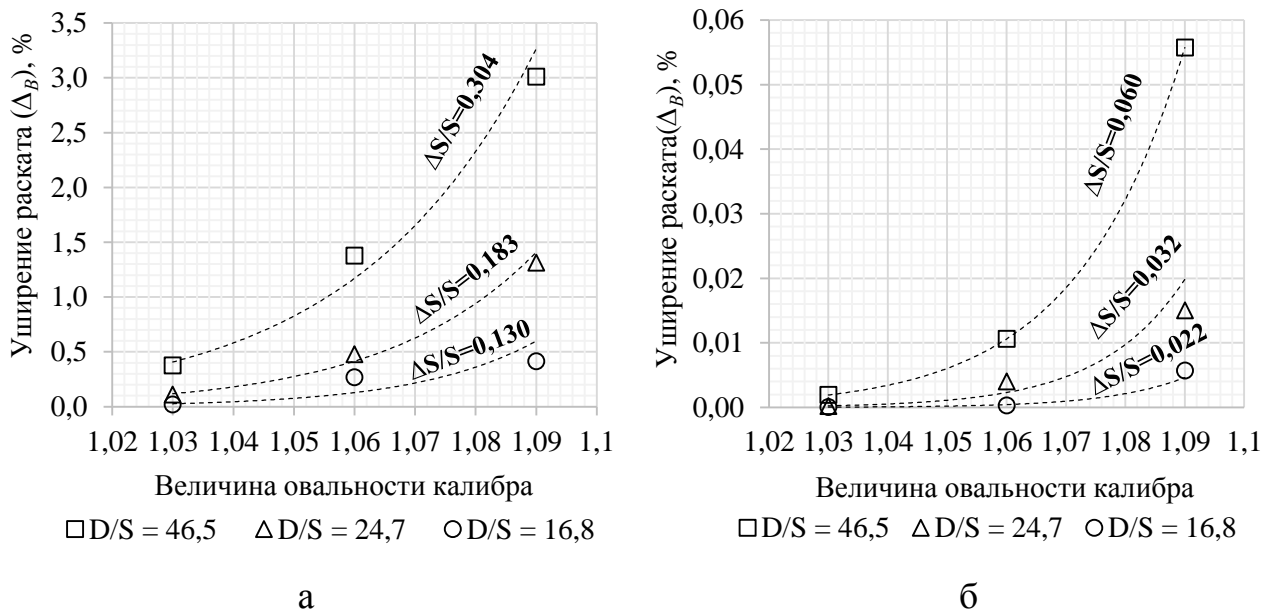


Рисунок 19 – Уширение раската в зависимости от величины овальности калибра и параметра тонкостенности после:

а – первого прохода; б – второго прохода

При аппроксимации результатов определена экспериментальная зависимость с использованием которой численно может быть рассчитан геометрический параметр раската  $B_{p(i)}$ . Величина параметра  $B_{p(i)}$  используется при расчете

первичного захвата раската валками, являющегося одним из параметров системы ограничений процесса раскатки в чистовых калибрах:

$$B_{p(i)} = \frac{B_{\kappa(i)}}{0,985 \Theta_{(i)}^{S_{\text{верш}(i)}/S_{\text{вып}(i-1)}}}. \quad (44)$$

где  $B_{\kappa i}$  – половина ширины  $i$ -го калибра.

На третьем этапе проведен анализ изменения толщины стенки в выпуске калибра. Важность данного параметра заключается в том, что при расчете вторичного захвата, являющегося одним из параметров системы ограничений процесса раскатки, требуется численное определение фактической толщины стенки в выпуске предшествующего калибра, которая, как известно, в процессе деформации подвергается изменению, то есть стенка может либо утолщаться, либо утоняться.

На основании результатов физического моделирования были проведены измерения толщины стенки раскатываемого патрубка в вершине и выпуске калибра соответственно до и после раскатки. Относительная величина изменения толщины стенки раската в выпуске калибра, определялась в соответствии с формулой:

$$\Delta_s = \frac{S_{\text{вып}(i)}}{S_{\text{верш}(i-1)}} - 1, \quad (45)$$

где  $S_{\text{верш}(i-1)}$  – толщина стенки в вершине предшествующего калибра;

$S_{\text{вып}(i)}$  – толщина стенки в выпуске  $i$ -го калибра.

Следует отметить, что при расчете по формуле (45) знак «+» свидетельствует о том, что стенка в выпуске калибра получает некоторое утолщение, знак «-» – утонение. Результаты исследования представлены на рисунке 20.

Полученная экспериментальная зависимость позволила конкретизировать условную границу, при которой деформация раската в чистовых 3-валковых калибрах осуществляется без изменения толщины стенки в выпусках калибра.

Следует отметить, что экспериментальные точки, соответствующие коэффициенту вытяжки более 1,2, были получены ранее, при деформации раската в 3-х проходах, необходимых для получения подката для чистовых калибров.

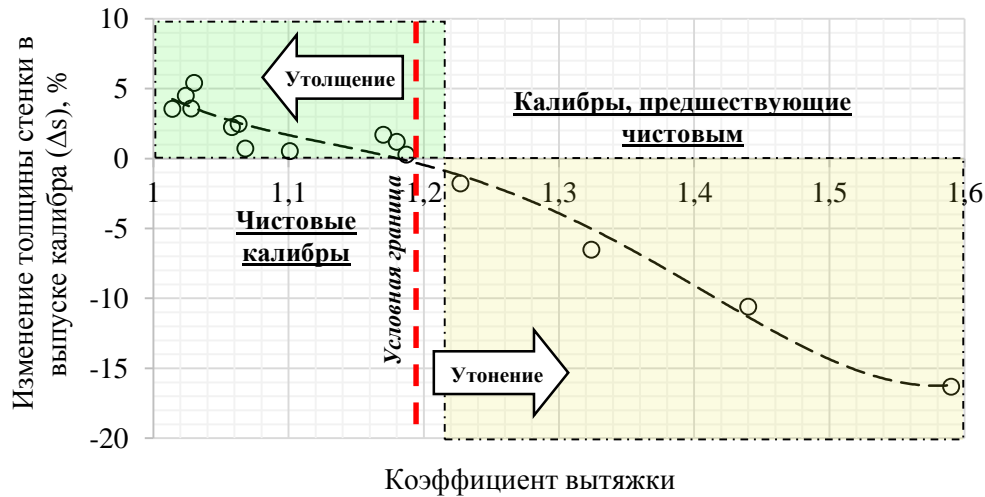


Рисунок 20 – Изменение толщины стенки в выпусках калибра в зависимости от коэффициента вытяжки

Распределение точек, приведенных на рисунке 20, для диапазона изменения коэффициента вытяжки:

1) от 1,0 до 1,6 описывается уравнением 4 порядка:

$$\Delta_s(\mu_1) = 842,39\mu^4 - 4279,3\mu^3 + 8053,1\mu^2 - 6689,1\mu + 2077,9; \quad (46)$$

2) от 1,0 до 1,20 (деформация в чистовых калибрах) описывается уравнением 1 порядка:

$$\Delta_s(\mu_2) = 24,4\mu - 28,7. \quad (47)$$

При решении уравнения (46) установлено, что при деформации раската в чистовых калибрах, при коэффициенте вытяжки менее 1,183 стенка раската в выпуске калибра утолщается, при большем значении коэффициента вытяжки – утоняется. Следует отметить, что при прокатке в 2-валковых калибрах [99], условная граница, при которой раскат деформируется без изменения толщины стенки в выпуске калибра, соответствует коэффициенту вытяжки равному 1,1, что

обусловлено большим врезом калибра и соответственно большим перепадом окружных скоростей по периметру ручья валка.

Таким образом, зная толщину стенки в вершине предшествующего калибра, толщину стенки в выпуске последующего (чистового) калибра можно определить в соответствии с формулой:

$$S_{\text{вып}(i)} = S_{\text{верш}(i-1)} \cdot (1,287 - 0,244 \cdot \mu_i). \quad (48)$$

## 2.2 Разработка алгоритма оптимизации и методики расчета параметров прокатного инструмента

Для построения алгоритма нахождения оптимального значения целевой функции в основу решения оптимизационной задачи положен метод Бокса-Уилсона, объединяющий в себе положительные стороны трех методов: Гаусса-Зейделя, метода градиента и метода полного либо дробного факторного эксперимента, как средства получения математической модели [135, 136].

Метод Бокса-Уилсона можно считать экспериментально-аналитической разновидностью градиентных методов нелинейного программирования, а его решение выполняется так, чтобы шаговое движение осуществлялось в направлении наискорейшего спуска [137].

### 2.2.1 Алгоритм расчета критерия оптимизации

Определение оптимальной величины овальности чистовых калибров 3-валковых раскатных станов продольной прокатки осуществляется в следующей последовательности:

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

$$D^{(0,0)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)}; \Theta_i^{(0,0)}). \quad (49)$$

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:

$$\left\{ \begin{array}{l} D^{(0,1)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} - 0,01; \Theta_i^{(0,0)} - 0,01); \\ D^{(0,2)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} + 0,01; \Theta_i^{(0,0)} - 0,01); \\ D^{(0,3)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} - 0,01; \Theta_i^{(0,0)} + 0,01); \\ D^{(0,4)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} + 0,01; \Theta_i^{(0,0)} + 0,01). \end{array} \right. \quad (50)$$

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

5. Составляется матрица планирования полного факторного эксперимента (план эксперимента), приведенная в таблице 5, где общее число опытов ( $N$ ) определяется формулой:

$$N = m^k = 2^2 = 4, \quad (51)$$

где  $m$  – число уровней факторов;

$k$  – число факторов.

Таблица 5 – План эксперимента

№ Опыта	Факторы, их взаимодействие и условное обозначение						Значение критерия оптимизации
	$\Theta_{i-1}$		$\Theta_i$		$\Theta_{i-1}\Theta_i$		
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:

$$D = a_0 + a_1\Theta_{i-1} + a_2\Theta_i + a_{12}\Theta_{i-1}\Theta_i. \quad (52)$$

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 ( $grad D$ ):

$$\Delta\Theta_i = \frac{\Delta\Theta_{i-1} \cdot a_2}{a_1}, \quad (53)$$

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

8. Определяется направление вектора градиента и осуществляется переход в новую точку:

$$D^{(1,0)}(\Theta_{i-1} - \Delta\Theta_{i-1}; \Theta_i - \Delta\Theta_i). \quad (54)$$

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 за оптимальную, если значения критерия оптимизации в окрестностях полученной точки, исследуемых с разным шагом, остается минимальной.

### **2.2.2 Разработка методологии обработки данных компьютерного моделирования**

Численная реализация метода оптимизации базируется на компьютерном моделировании с использованием программы Deform-3D, основанной на методе конечных элементов [138, 139]. С использованием Deform-3D определяется форма поперечного сечения раската на выходе из последней клетки стана. Распределение толщины стенки в поперечном сечении раската осуществляется для каждой точки фазового пространства изменения величины овальности калибра последней и предпоследней клетки, определяемой в соответствии с решением оптимизационной задачи.

При выходе переднего конца раската за последнюю клетку стана на расстояние 600 мм (рисунок 21а) строится разрез поперечного сечения очага деформации (рисунок 21б), и регистрируется изображение высокой четкости с целью последующей обработки в приложении Компас-2D (рисунок 22). Следует отметить, что с целью оценки достоверности получаемых результатов измерений толщины стенки, для каждой исследуемой точки фазового пространства, осуществляется корректировка масштаба изображения на основе сравнительного анализа величин исходного и фактического диаметра оправок раскатного стана.

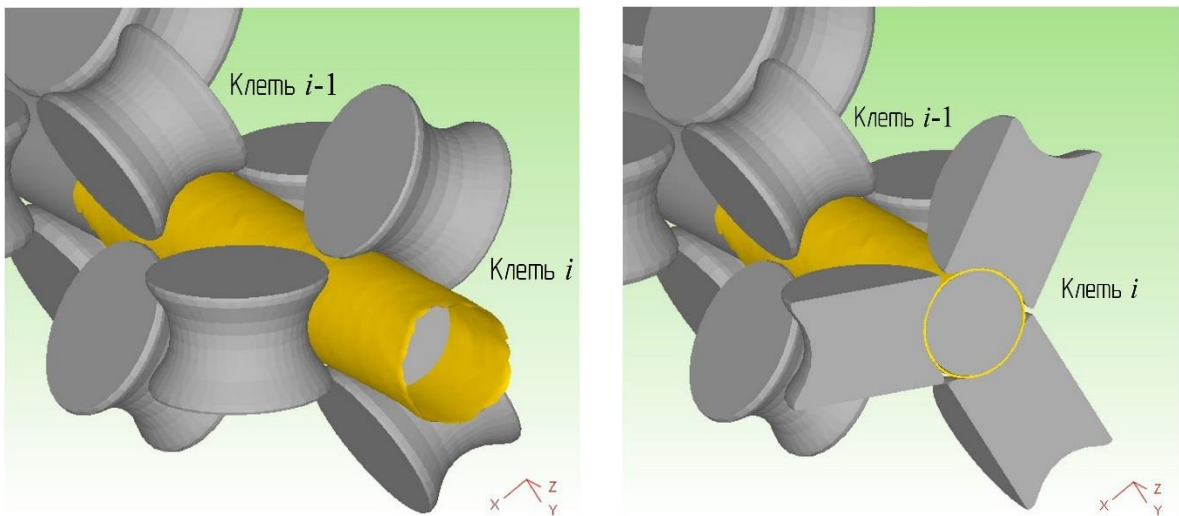


Рисунок 21 – К определению характера распределения толщины стенки раската за последней ( $i$ ) клетку непрерывного раскатного стана:

- а – выход раската за последнюю клетку на расстояние 600 мм;
- б – разрез поперечного сечения очага деформации

Для расчета критерия оптимизации толщина стенки измеряется в поперечном сечении раската на выходе из последней клетки стана в 72 точках, ориентированных относительно центра калибра. Схема измерений геометрических параметров в поперечном сечении раската представлена на рисунке 22.

Толщины соответствующих стенок раската усредняются, например, толщина стенки в вершине калибра усредняется в точках  $S_1$ ,  $S_{25}$  и  $S_{49}$  (рисунок 22). При определении критерия оптимизации коэффициент Стьюдента, для выборки из 72 измерений толщины стенки, рассчитывается при доверительной вероятности 95% и является постоянной величиной, равной 1,994 [140, 141].

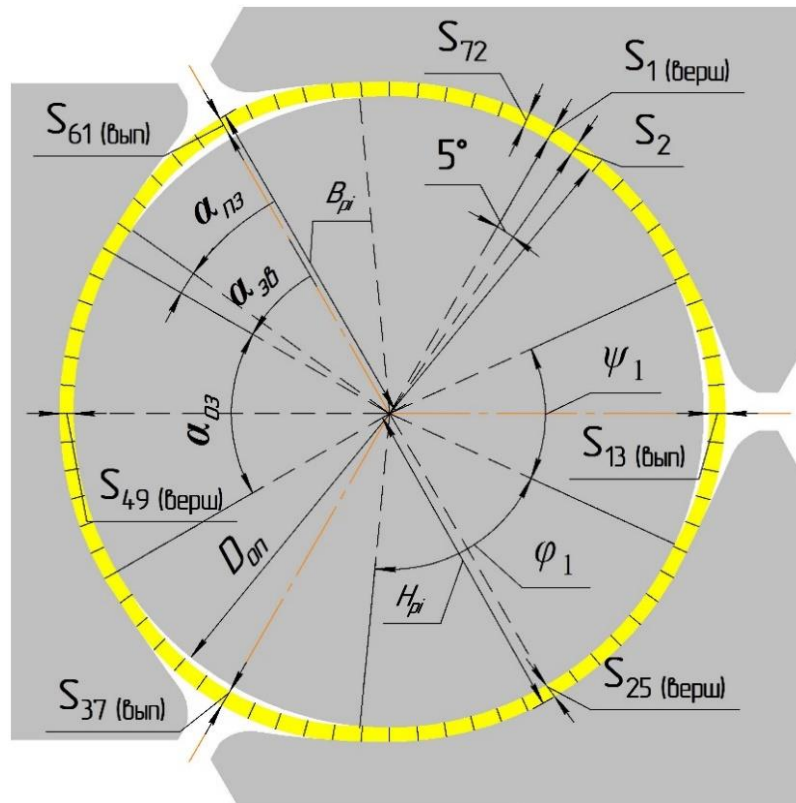


Рисунок 22 – Схема измерений геометрических параметров в поперечном сечении раската с использованием Компас-2D

В качестве базовой, в программном продукте Компас-3D, разработана модель 5-клетевого 3-валкового стана с удерживаемой оправкой (рисунок 23).

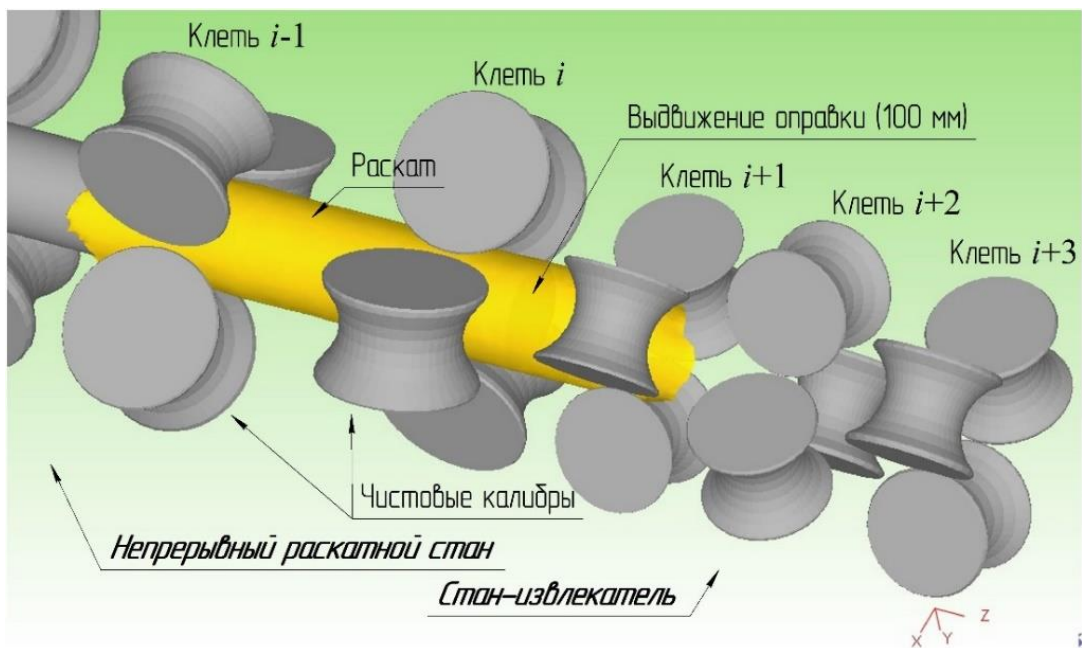


Рисунок 23 – Базовая модель стана, реализованная в Deform-3D



Для извлечения раската с оправки предусмотрен 3-клетевой стан-извлекатель. Наличие стана-извлекателя необходимо с точки зрения определения возможности извлечения раската в зависимости от величин овальности чистовых калибров. С целью сокращения времени моделирования расстояние между непрерывным станом и станом-извекателем принято равным 730 мм. Выдвижение оправки за последнюю клетку ( $i$ ) непрерывного стана в момент выхода переднего конца раската из стана составляет 100 мм (рисунок 23), в момент торможения оправки – 430 мм, при этом раскат деформируется одновременно в последней ( $i$ ) клетки непрерывного стана и двух клетях ( $i+1$  и  $i+2$ ) стана-извлекателя. Расстояние между чистовыми клетями непрерывного стана принято равным 700 мм, и 600 мм – между клетями стана-извлекателя.

Геометрические параметры калибровки валков базовой модели стана представлены в таблицах 6, 7.

Таблица 6 – Геометрические параметры калибровки валков раскатного стана

Номер клетки по порядку / Условное обозначение клетки		1 / ( $i-4$ )	2 / ( $i-3$ )	3 / ( $i-2$ )	4, 5 / ( $i-1$ ), ( $i$ )
Координаты центра радиуса галтели R5	$x_{c5}$	184,56	178,58	176,22	175,14
	$y_{c5}$	225,79	181,27	171,94	144,54
Координаты центра радиуса выпуска R2	$x_{c2}$	-198,78	-195,99	-192,60	-144,00
	$y_{c2}$	-362,3	-348,47	-333,59	-249,42
Координаты центра радиуса обжимной зоны R1	$x_{c1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
	$y_{c1}$	-6,00	-3,00	0,00	0,00
Эксцентриситет	$E$	6,00	3,00	0,00	0,00
Радиус галтели	$R_5$	90,00	53,00	48,00	27,00
Радиус выпуска	$R_2$	612,00	595,00	577,80	480,00
Радиус обжимной зоны	$R_1$	204,00	198,60	192,60	192,00
Угол сопряжения	$\alpha_5$	48,00	43,00	42,00	38,00
Угол выпуска	$\alpha_1$	60,00	60,00	60,00	60,00
Межвалковый зазор	$W$	34,00	32,00	28,00	24,00
Ширина валка	$L$	420,00	420,00	420,00	380,00
Диаметр по дну валка	$\varnothing F_g$	600,00	615,00	620,0	423,00
Номинальный диаметр валка	$\varnothing N$	996,00	1006,00	1005,00	807,00

Таблица 7 – Геометрические параметры калибровки валков стана-извлекателя

Номер клетки по порядку / Условное обозначение клетки		1 / (i+1)	2 / (i+2)	3 / (i+3)
Координаты центра радиуса галтели R5	$x_{c_5}$	173,22	167,09	163,78
	$y_{c_5}$	113,82	110,07	107,55
Координаты центра радиуса профиля валка R1	$x_{c_1}$	0,00	0,00	0,00
	$y_{c_1}$	-15,59	-7,57	0,00
Эксцентриситет	$E$	15,59	7,57	0,00
Радиус галтели	$R_5$	11,46	11,28	11,25
Радиус профиля валка	$R_1$	204,77	193,07	185,00
Угол сопряжения	$\alpha_5$	33,00	33,00	33,00
Межвалковый зазор	$W$	1,00	1,00	1,00
Ширина валка	$L$	360,00	360,00	360,00
Диаметр по дну валка	$\varnothing F_g$	276,66	284,00	286,16
Номинальный диаметр валка	$\varnothing N$	655,00	655,00	655,00

Построение калибровки валков непрерывного раскатного стана и стана-извлекателя осуществляется в соответствии с рисунком 24.

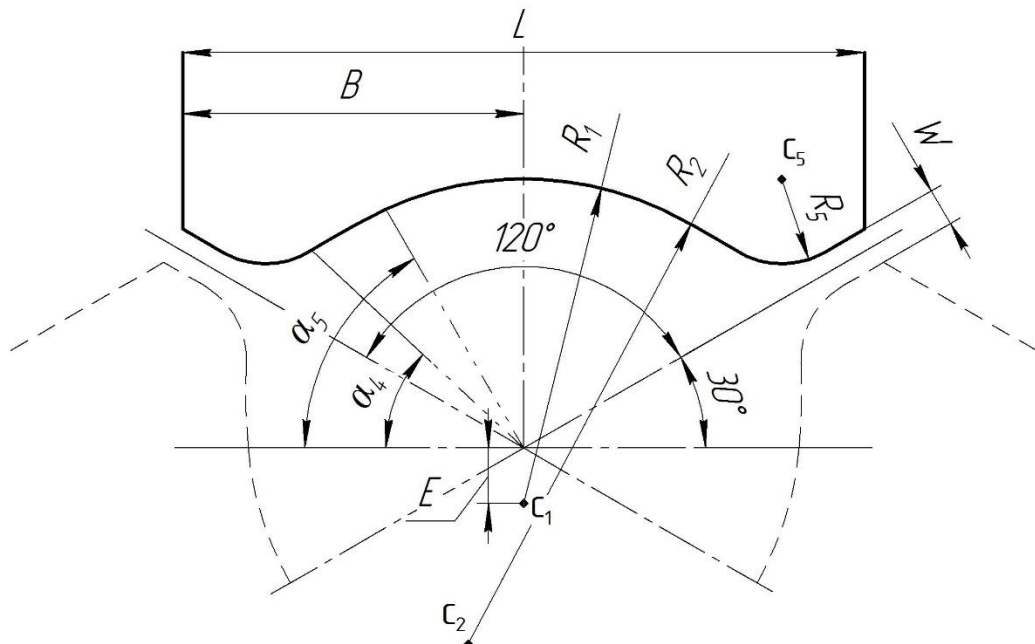


Рисунок 24 – Построение калибровки валков базовой модели стана

В качестве исходной заготовки выбрана гильза наружным диаметром 433 мм с толщиной стенки 26,9 мм ( $D/S=16,1$ ). Диаметр оправки раскатного стана составляет 368 мм. С целью сокращения времени моделирования и увеличения

числа элементов сетки гильзы, её длина принята равной 600 мм. Принятая длина гильзы обеспечивает одновременную деформацию раската в последней и предпоследней клетки непрерывного раскатного стана. Количество узлов и элементов сетки составляет соответственно 19181 и 81898 шт., поверхностных многоугольников – 21256 шт. При этом для материала заготовки (AISI-1045) задаются следующие параметры: сопротивление пластической деформации в зависимости от степени (от 0,02 до 0,37), скорости (от 0,4 до 50 с<sup>-1</sup>) и температуры (от 900 до 1200 °С) деформации, а также плотность, теплопроводность, теплоемкость плавления и начальная температура. Инструмент принимается абсолютно жестким. Температура инструмента (валки, оправка) принята равной 90 °С. Температура окружающей среды 20 °С. Начальная температура ( $T_0$ ) гильзы принята равной 1150 °С. Изменение температуры гильзы по клетям стана определяется по эмпирической формуле (55), полученной на основе анализа и обработки результатов измерений фактической температуры при раскатке гильз с использованием непрерывного раскатного стана с 3-валковыми клетями.

$$\Delta t_i = 3,623 \ln \left[ S_{\text{вып}(i-1)} - S_{\text{верш}(i)} \right] + 53,993 \frac{r_i}{v_i} + 5,973, \quad (55)$$

где  $\Delta t_i$  – изменение температуры гильзы в  $i$ -ой клетки стана, °С;

$r_i$  – расстояние от первой до  $i$ -ой клетки стана, мм;

$v_i$  – скорость раската в  $i$ -ой клетки стана, мм/с.

Частота вращения валков определяется по формуле:

$$n_{\text{об/мин}} = \frac{60 \cdot v_{i-1} \cdot \mu_i}{\pi \cdot [D_i - k_\phi \cdot D_{ki}]}, \quad (56)$$

где  $v_{i-1}$  – скорость раската на выходе из предшествующей клетки, мм/с;

$\mu_i$  – коэффициент вытяжки в  $i$ -ой клетки;

$D_i$  – идеальный диаметр валков калибра в  $i$ -ой клетки, мм;

$D_{ki}$  – диаметр калибра в  $i$ -ой клетки, мм;

$k_\phi$  – коэффициент формы калибра в  $i$ -ой клетки.

Коэффициент формы калибра  $k_f$  для раскатного стана 3-валковыми клетями предпочтительно задавать из диапазона:  $[0,79 \div 0,83]$  – для клетки  $(i-4)$ ;  $[0,84 \div 0,87]$  – для клетки  $(i-3)$ ;  $[0,88 \div 0,91]$  – для клетки  $(i-2)$ ;  $[0,92 \div 0,95]$  – для клетки  $(i-1)$ ;  $[0,96 \div 0,99]$  – для клетки  $(i)$ .

Данные по частоте вращения валков базовой модели стана, обеспечивающей режим без натяжения и подпора, представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Частота вращения валков по клетям стана

Параметр	Непрерывный раскатной стан					Стан-извлекатель		
	$(i-4)$	$(i-3)$	$(i-2)$	$(i-1)$	$(i)$	$(i+1)$	$(i+2)$	$(i+3)$
Частота вращения, об/мин	33,1	47,9	63,5	116,2	122,9	172,4	168,6	166,8

Теплообмен между заготовкой, инструментом и окружающей средой осуществляется путем конвекции и излучения в соответствие с параметрами окружающей среды. При взаимодействии между инструментом и заготовкой коэффициент трения на контактной поверхности валка и раската принят равным 0,3 [115, 142-145] и 0,06 [146] на контактной поверхности раската и оправки. Скорость удержания (перемещения) оправки принята равной 700 мм/с. Скорость задачи гильзы в первую клетку стана 750 мм/с.

При выходе оправки за последнюю клетку непрерывного раскатного стана на расстояние 430 мм скорость оправки падает до нуля. В момент выхода заднего конца раската из последней клетки стана оправка ускоренно возвращается в исходное положение (на входную сторону стана). Общее число шагов расчета для каждого варианта моделирования составляет 500. Сохранение данных осуществляется через каждые 0,05 сек. процесса раскатки.

Калибры чистовых клетей  $(i-1)$  и  $(i)$  раскатного стана имеют идентичную калибровку валков. Радиус обжимной зоны чистового калибра и радиус оправки концентричны. Отношение углов выпуска к обжимной зоне калибра в каждом проходе равняется 1, то есть толщина стенки, соответствующая выпуску калибра в

предшествующей клетки гарантировано обжимается в последующем чистовом калибре. Чистовые калибры базовой модели стана имеют одинаковую величину овальности равную 1,09.

При решении оптимизационной задачи требуется численно и в оперативном режиме осуществлять расчет геометрических параметров чистовых калибров на каждом шаге оптимизации. В данной связи, для определения координат точек сопряжения обжимной зоны и зоны выпуска калибра, центра радиуса выпуска калибра, диапазона варьирования величины овальности, ширины и радиуса выпуска чистовых калибров, исходя из геометрических возможностей построения калибровки, разработана математическая модель, учитывающая эксцентриситет ( $E$ ) радиуса обжимной зоны калибра, зависящий от величины свода / развода ( $W$ ) валков.

Исходными данными для расчета являются: радиус калибра ( $R_k$ ), эксцентриситет обжимной зоны калибра ( $E$ ) и угол выпуска ( $\alpha_6$ ). Допущением математической модели является принятая по умолчанию бесконечно малая величина смещения радиуса обжимной зоны калибра  $\Delta E = 10^{-10}$  мм. Расчет величин осуществляется в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 23.

Координаты точки сопряжения радиусов обжимной зоны калибра и зоны выпуска определяются по формулам:

$$ox_{m.c.} = \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \frac{a}{b}, \quad oy_{m.c.} = \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \frac{a}{b}, \quad (57)$$

где коэффициенты  $a$  и  $b$  рассчитываются в соответствии с выражениями (4) и (5):

$$a = E \cdot \sin \left[ \left[ 90 - \alpha - \left[ \arcsin \left[ \frac{E \cdot \sin \left[ (120 + \alpha_6) \cdot \frac{\pi}{180} \right]}{R_k + E} \right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \right] \cdot \frac{\pi}{180} \right], \quad (58)$$

$$b = \sin \left[ \left[ \arcsin \left[ \frac{E \cdot \sin \left[ (120 + \alpha_6) \cdot \frac{\pi}{180} \right]}{R_k + E} \right] \right] \right]. \quad (59)$$

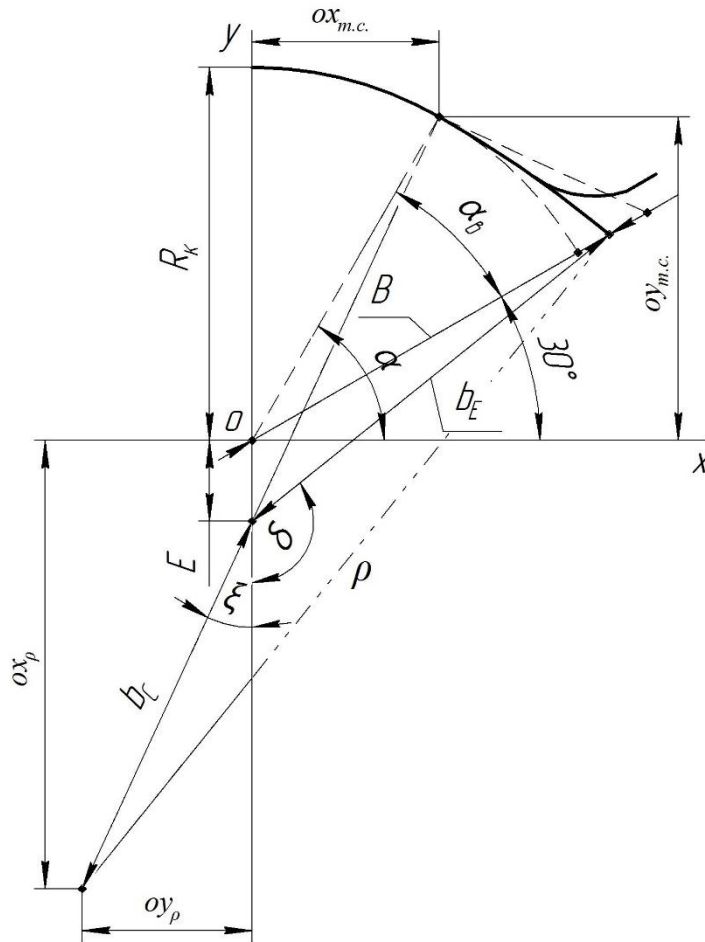


Рисунок 23 – Схема к определению параметров калибровки валков

### *Граничные условия овальности калибра по построению*

В процессе оптимизации высота калибра является постоянной, поэтому величина овальности калибра, рассчитываемая по формуле (60), определяется изменением ширины калибра:

$$\Theta = \frac{B_k}{H_k} = \frac{B_k}{R_k}, \quad (60)$$

где  $B_k$  и  $H_k$  – половина ширины и высоты калибра

Для определения минимальной и максимальной ширины калибра, определяющей и диапазон варьирования величины овальности, исходя из геометрических возможностей построения, формулу, в общем виде, запишем как отношение величин:

$$B = \frac{c}{d}. \quad (61)$$

Коэффициенты  $c_{max}$  и  $d_{max}$ , определяющие максимальную ширину калибра по построению рассчитываются соответственно с формулами (62) и (63):

$$c_{max} = \left[ \sqrt{R_{\kappa} \cdot (R_{\kappa} + 2 \cdot Ex)} - E \cdot \sin \left( \alpha \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right] \cdot \sin \left[ \left[ 90 + \arcsin \left[ \frac{E \cdot \sin \left[ (120 + \alpha_{\epsilon}) \cdot \frac{\pi}{180} \right]}{(R_{\kappa} + E)} \right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \cdot \frac{\pi}{180} \right], \quad (62)$$

$$d_{max} = \sin \left[ \left[ 180 - \left[ 90 + \arcsin \left[ \frac{E \cdot \sin \left[ (120 + \alpha_{\epsilon}) \cdot \frac{\pi}{180} \right]}{(R_{\kappa} + E)} \right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] - \alpha_{\epsilon} \right] \cdot \frac{\pi}{180} \right], \quad (63)$$

Коэффициенты  $c_{min}$  и  $d_{min}$ , определяющие минимальную ширину калибра по построению рассчитываются по формулам (64) и (65):

$$c_{min} = \sin \left[ \left[ 60 - \left[ \arcsin \left[ \frac{\sqrt{3} \cdot E}{2(R_{\kappa} + E)} \right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \right] \cdot \frac{\pi}{180} \right] \cdot E, \quad (64)$$

$$d_{min} = \sin \left[ \arcsin \left[ \frac{\sqrt{3} \cdot E}{2(R_{\kappa} + E)} \right] \right]. \quad (65)$$

#### *Расчет величины радиуса выпуска калибра*

Прямая, проходящая через центр радиуса обжимной зоны калибра и точку касания радиусного выпуска на линии разъема валков определяется на основании выражения:

$$b_E = \sqrt{E^2 + B^2 + E \cdot B}. \quad (66)$$

Угол между прямой, соединяющей точку сопряжения радиусов обжимной зоны и зоны выпуска калибра с точкой центра обжимной зоны, и осью симметрии валка (OY) определяется из выражения:

$$\zeta = \left[ \pi - \left( \frac{2\pi}{3} + \alpha_{\epsilon} \cdot \frac{\pi}{180} \right) - \arcsin \left[ \frac{E \cdot \sin \left[ (120 + \alpha_{\epsilon}) \cdot \frac{\pi}{180} \right]}{(R_{\kappa} + E)} \right] \right] \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (67)$$

Угол между  $b_E$  и осью  $OY$  определяется из выражения:

$$\delta = 180 - \arcsin\left(\frac{\sqrt{3} \cdot B}{2 \cdot b_E}\right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (68)$$

На основании вышеизложенных выкладок, величина радиуса выпуска определяется из выражения:

$$\rho = \frac{(E + R_k)^2 + [b_E + 2(E + R_k)] \cdot b_E \cdot \cos\left[(\zeta + \delta) \cdot \frac{\pi}{180}\right]}{2 \cdot \left[(E + R_k) + b_E \cdot \cos\left[(\zeta + \delta) \cdot \frac{\pi}{180}\right]\right]}, \quad (69)$$

а координаты центра радиуса выпуска в соответствии с формулами:

$$ox_\rho = -\left[\sin\left(\zeta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot b_c\right], \quad oy_\rho = -\left[E + \cos\left(\zeta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot b_c\right], \quad (70)$$

где величина  $b_c$  определяется выражением:

$$b_c = \left[\frac{(\rho - (R_k + E)) \cdot \sin\left(\zeta \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\left(\sin(180 - \zeta) \cdot \frac{\pi}{180}\right)}\right]. \quad (71)$$

Величина межвалкового зазора определена на основании анализа калибровок валков действующих раскатных станов с 3-валковыми клетями [37, 82, 83, 103-106]. Результаты исследования позволили установить взаимосвязь изменения исследуемой величины в зависимости от диаметра калибра последней клетки раскатного стана (рисунок 24).

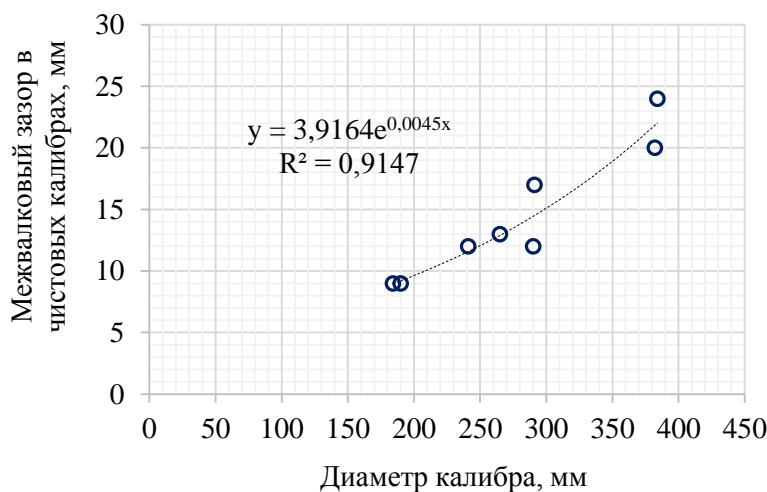


Рисунок 24 – Изменение межвалкового зазора в чистовых калибрах



При проектировании системы калибров раскатного стана с 3-валковыми клетями величина межвалкового зазора в чистовых калибрах численно может быть определена по формуле:

$$W = 3,92e^{0,0045D_k} . \quad (72)$$

Разработанная модель расчета реализована в приложении Mathcad. Для проверки адекватности модели был проведен расчет геометрических параметров чистовых калибров (4, 5 / (i-1), (i)) приведенных в таблице 8. Результаты расчета, приведенные в Приложении Д, показывают высокую степень сходимости. Таким образом, разработанная модель позволит численно и в оперативном режиме осуществлять расчет геометрических параметров чистовых калибров для каждого шага оптимизации.

### 2.2.3 Расчет параметров процесса прокатки и системы ограничений

Расчет параметров процесса прокатки и системы ограничений сначала выполнен для точки начального приближения. Для остальных точек двухмерного фазового пространства расчет осуществляется по аналогии. Расчет системы ограничений в чистовых калибрах осуществлен в соответствии с параметрами, приведенными в таблице 9.

Таблица 9 – Параметры процесса раскатки в чистовых калибрах

Параметр		Калибры раскатного стана			
		Чистовые		Предшествующие чистовым	
Название	Обозначение	<i>i</i>	<i>i-1</i>	<i>i-2</i>	<i>i-3</i>
Толщина стенки в вершине калибра	$S_{\text{верш}}, \text{ мм}$	8,0	8,0	8,5	11,5
Коэффициент вытяжки	$\mu$	1,03	1,17		
Обжатие стенки в вершине калибра	$\Delta S/S$	0,059	0,304		
Расстояние до чистового калибра	$r, \text{ мм}$	4000	3000		
Степень тонкостенности раската	$D/S$	48			

В качестве точки начального приближения выбрана величина овальности последнего ( $i$ ) и предпоследнего ( $i-1$ ) чистового калибра стана, равная 1,09:

$$\Theta_{i-1}^{(0,0)} = \Theta_i^{(0,0)} = 1,09 .$$

Геометрические параметры раската на выходе из чистовых калибров в точке начального приближения приведены на рисунке 25.

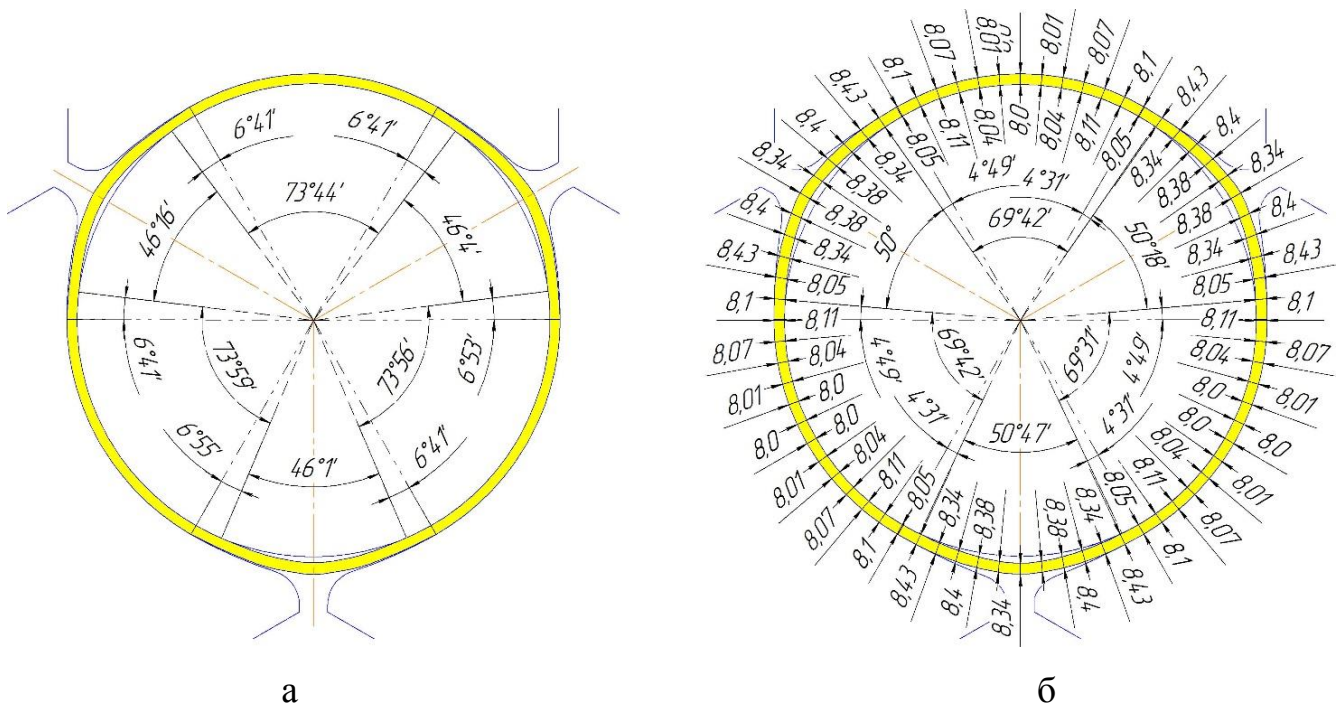


Рисунок 25 – Геометрические параметры раската в чистовых калибрах:

а – предпоследнем ( $i-1$ ); б – последнем ( $i$ )

Значение критерия оптимизации в точке начального приближения определяется в соответствии с формулами (2), (3):

$$D^{(0,0)}(1,09;1,09) = 0,0596 \cdot 1,994 \cdot 100 = 11,88\% .$$

Далее осуществляется расчет параметров системы ограничений процесса в соответствии с условиями приведенными в п. 2.1.2.1 и п. 2.1.2.2.

## 1) Первичный захват раската валками

Определяем изменение температуры раската при прокатке в чистовых калибрах в соответствии с формулой (55) при начальной температуре гильзы, равной 1150 °С:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$\Delta t_{i-1} = 3,623 \ln [1,5 \cdot (1,287 - 0,244 \cdot 1,17) - 8,0] + 53,993 \frac{3000}{2660,7} + 5,973 = 71,41^\circ ;$$

- для последнего чистового калибра:

$$\Delta t_i = 3,623 \ln [8,5 \cdot (1,287 - 0,244 \cdot 1,03) - 8,0] + 53,993 \frac{4000}{2750} + 5,973 = 83,72^\circ .$$

На основании полученных результатов температура раската:

- в предпоследнем чистовом калибре:

$$T_{i-1} = T_0 - \Delta t_{i-1} = 1150 - 74,41 = 1078,59^\circ ;$$

- в последнем чистовом калибре:

$$T_i = T_0 - \Delta t_i = 1150 - 83,72 = 1066,28^\circ .$$

Коэффициент трения на контактной поверхности раската с валком при прокатке в чистовых калибрах определяется в соответствии с формулой [115, 142-144]:

$$f_1 = k_{II} k_M k_v \cdot [0,84 - 0,0004t],$$

где  $k_{II} k_M k_v$  – коэффициенты, учитывающие соответственно состояние поверхности и материал валков, содержание углерода в стали и скорость прокатки, определяемые в соответствии работой [145].

Коэффициент трения на контактной поверхности раската с валком составляет:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$f_{1(i-1)} = 1,0 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot [0,84 - 0,0004 \cdot 1078,59] = 0,294 ;$$

- для последнего чистового калибра:

$$f_{1(i)} = 1,0 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot [0,84 - 0,0004 \cdot 1066,28] = 0,298 .$$

Определяем ширину раската в соответствии с формулой (44) и результатами компьютерного моделирования:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$B_{p(i-1)} = \frac{192 \cdot 1,09}{0,985 \cdot 1,09^{8,0/11,5}} = 200,06 \text{ мм};$$

- для последнего чистового калибра:

$$B_{p(i)} = \frac{192 \cdot 1,09}{0,985 \cdot 1,09^{8,0/8,5}} = 195,87 \text{ мм}.$$

Угол первичного захвата, определяемый в соответствии с формулой (31) и результатами компьютерного моделирования, принимает значение:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$\alpha_{0(i-1)} = \arccos \left[ 1 - \frac{200,06 - 184 - 8,0}{270,5} \right] \cdot \frac{180}{\pi} = 14,02^\circ;$$

- для последнего чистового калибра:

$$\alpha_{0(i)} = \arccos \left[ 1 - \frac{195,87 - 184 - 8,0}{270,5} \right] \cdot \frac{180}{\pi} = 9,7^\circ.$$

Тогда условие первичного захвата запишется в виде:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$g_{1(i-1)} = f_{1(i-1)} - \operatorname{tg} \alpha_{0(i-1)} = 0,294 - \operatorname{tg}(14,02) = 0,044 > 0;$$

- для последнего чистового калибра:

$$g_{1(i)} = f_{1(i)} - \operatorname{tg} \alpha_{0(i)} = 0,298 - \operatorname{tg}(9,7) = 0,127 > 0.$$

Следовательно, при заданной величине овальности чистовых калибров и параметров процесса раскатки, соответствующих точке начального приближения, условие первичного захвата для предпоследнего и последнего чистового калибра непрерывного раскатного стана выполняется.

## 2) Вторичный захват с учетом отрицательного воздействия оправки

Определяем угол вторичного захвата в соответствии с формулой (32):

- для предпоследнего чистового калибра:

$$\alpha_{1(i-1)} = \arccos \left[ 1 - \frac{11,5 - 8,0}{270,5} \right] \cdot \frac{180}{\pi} = 9,23^\circ ;$$

- для последнего чистового калибра:

$$\alpha_{1(i)} = \arccos \left[ 1 - \frac{8,5 - 8,0}{270,5} \right] \cdot \frac{180}{\pi} = 3,48^\circ .$$

Тогда условие вторичного захвата с учетом коэффициента трения, на поверхности контакта раската с оправкой, равного 0,06 [146], запишется в виде:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$g_{2(i-1)} = f_{1(i-1)} - \operatorname{tg} \alpha_{1(i-1)} - k_1 \cdot f_2 = 0,294 - \operatorname{tg} \left( 9,23 \cdot \frac{\pi}{180} \right) - \frac{218,4}{360} \cdot 0,06 = 0,095 > 0 ;$$

- для последнего чистового калибра:

$$g_{2(i)} = f_{1(i)} - \operatorname{tg} \alpha_{1(i)} - k_1 \cdot f_2 = 0,298 - \operatorname{tg} \left( 3,48 \cdot \frac{\pi}{180} \right) - \frac{207,06}{360} \cdot 0,06 = 0,122 > 0 .$$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что условие вторичного захвата с учетом отрицательного воздействия оправки на раскат для предпоследнего и последнего чистового калибра выполняется.

## 3) Условие заполнения очага деформации и межклетевого промежутка

В соответствии с формулами (49) и (50) определяем длину зоны редуцирования и длину зоны обжатия по стенке:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$l_{1(i-1)} = \sqrt{\left[ \frac{270,5 \cdot \sin \left( (14,02 - 9,23) \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{\cos \left[ 0,5 \cdot \left( (14,02 - 9,23) \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right]} \right]^2 - [200,06 - 11,5 - 184]^2} = 22,2 \text{ мм} ;$$

$$l_{2(i-1)} = \sqrt{\left[ \frac{270,5 \cdot \sin \left( 9,23 \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{\cos \left[ 0,5 \cdot \left( 9,23 \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right]} \right]^2 - [11,5 - 8,0]^2} = 43,4 \text{ мм} .$$

- для последнего чистового калибра:

$$l_{1(i)} = \sqrt{\left[ \frac{270,5 \cdot \sin\left( (9,7 - 3,48) \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{\cos\left[ 0,5 \cdot \left( (9,7 - 3,48) \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right]} \right]^2 - [195,87 - 8,5 - 184]^2} = 29,2 \text{ мм};$$

$$l_{2(i)} = \sqrt{\left[ \frac{270,5 \cdot \sin\left( 3,48 \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{\cos\left[ 0,5 \cdot \left( 3,48 \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right]} \right]^2 - [8,5 - 8,0]^2} = 16,4 \text{ мм};$$

Тогда условие заполнения очага деформации, определяемое в соответствии с формулой (27) и  $l_3 = 0$  запишется в виде:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$g_{3(i-1)}(1,09;1,09) = 0,294 - \operatorname{tg}(9,23) - \frac{0,06}{180 \cdot \frac{\pi}{180}} \cdot \left[ \frac{184 \cdot 218,4 \cdot \frac{\pi}{180}}{2 \cdot 270,5 \cdot 14,02 \cdot 192 \cdot 180 \cdot \frac{\pi}{180}} \right] \cdot 43,4 = 0,126 > 0;$$

- для последнего чистового калибра:

$$g_{3(i)}(1,09;1,09) = 0,294 - \operatorname{tg}(3,48) - \frac{0,06}{180 \cdot \frac{\pi}{180}} \cdot \left[ \frac{184 \cdot 207,06 \cdot \frac{\pi}{180}}{2 \cdot 270,5 \cdot 9,7 \cdot 192 \cdot 180 \cdot \frac{\pi}{180}} \right] \cdot 16,4 = 0,228 > 0.$$

Условие заполнения межклетевого промежутка

В соответствии с формулой (27) величина заполнения межклетевого промежутка при  $l_3 = 700$  мм, принимает значение:

$$g_{3(i-1)(i)}(1,09;1,09) = 0,294 - \operatorname{tg}(9,23) - \frac{0,06}{180 \cdot \frac{\pi}{180}} \cdot \left[ \frac{184 \cdot 218,4 \cdot \frac{\pi}{180}}{2 \cdot 270,5 \cdot 14,02 \cdot 192 \cdot 180 \cdot \frac{\pi}{180}} \right] \cdot (43,4 + 700) = 0,029 > 0.$$

Следовательно, при заданной величине овальности чистовых калибров и параметрах процесса раскатки, соответствующих точке начального приближения, условие заполнения межклетевого промежутка для предпоследнего и последнего чистового калибра непрерывного раскатного стана выполняется.

Для определения характера изменения величины заполнения межклетевого промежутка для заданных параметров процесса прокатки осуществлено снижение величины овальности калибра с шагом 0,01 (рисунок 26). Полученные результаты

свидетельствуют о том, что характер заполнения межклетевого промежутка в зависимости от величины овальности чистового калибра является нелинейным. Для обеспечения стабильного заполнения межклетевого промежутка, при заданных параметрах процесса прокатки, величина овальности, при прочих равных условиях, должна быть не менее 1,035.

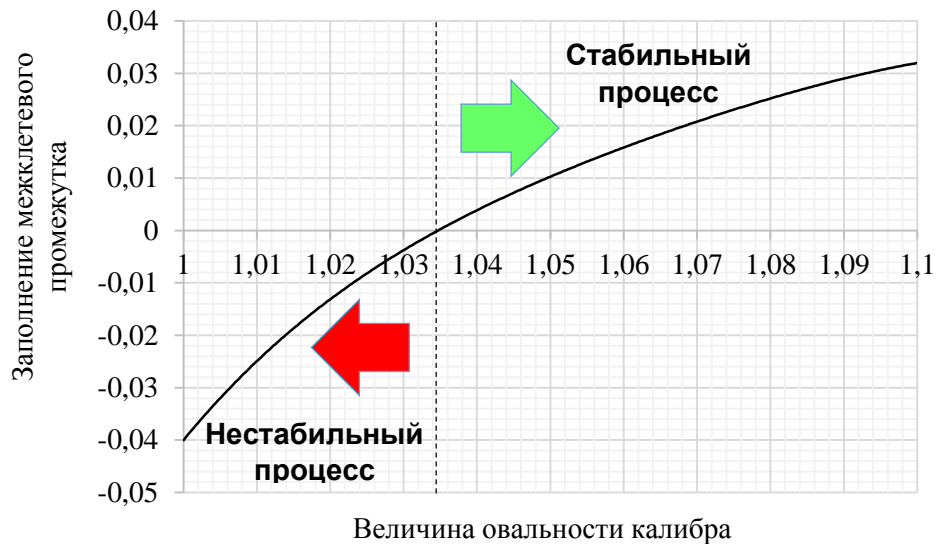


Рисунок 26 – Характер изменения величины заполнения межклетевого промежутка

#### 4) Угол охвата оправки

Результаты компьютерного моделирования, приведенные на рисунке 25, показывают, что при использовании чистовых калибров с величиной овальности 1,09 угол охвата оправки ( $\varphi$ ) составляет  $221,64^\circ$  и  $207,66^\circ$  соответственно для предпоследнего и последнего чистового калибра.

Для проверки адекватности разработанной формул (39), (40), осуществляется расчет коэффициента  $k_\varphi$ :

- для предпоследнего чистового калибра:

$$k_{\varphi(i-1)} = \left[ 1 - \frac{8,15}{11,77 \cdot (1,287 - 0,244 \cdot 1,17)} \right] \cdot \left[ \frac{8,15}{2 \cdot 192 \cdot 1,17} \right]^2 = 9,87 \cdot 10^{-5};$$

- для последнего чистового калибра:

$$k_{\varphi(i)} = \left[ 1 - \frac{8,0}{8,6 \cdot (1,287 - 0,244 \cdot 1,03)} \right] \cdot \left[ \frac{8,0}{2 \cdot 192 \cdot 1,03} \right]^2 = 3,73 \cdot 10^{-5}.$$

Тогда, с учетом параметров процесса прокатки, соответствующих точке начального приближения, угол охвата оправки составляет:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$\varphi_{i-1} = 569,9 \cdot 1,09^{-7,147} \cdot [9,87 \cdot 10^{-5}]^{0,4115-0,3433 \cdot 1,09} = 218,4^\circ ;$$

- для последнего чистового калибра:

$$\varphi_i = 569,9 \cdot 1,09^{-7,147} \cdot [3,73 \cdot 10^{-5}]^{0,4115-0,3433 \cdot 1,09} = 207,06^\circ .$$

Полученные значения углов охвата оправки, рассчитанные по разработанной формуле, с высокой точностью сопоставляется с результатами компьютерного моделирования.

5) Условие предельной величины овальности и угла охвата оправки

Далее, в соответствии с (41), определяется условие предельной величины овальности для предпоследнего и последнего чистового калибра:

$$g_{4(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = g_{1(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = 1,09 - 0,0004 \cdot 48 - 1,0258 = 0,045 > 0.$$

Определяем условие предельного угла охвата оправки:

- для предпоследнего чистового калибра:

$$g_{5(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = g_{2(i-1)}(1,09; 1,09) = 306,06 - 1,055 \cdot 48 - 221,64 = 33,78 > 0,$$

- для последнего чистового калибра:

$$g_{5(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = g_{2(i)}(1,09; 1,09) = 306,06 - 1,055 \cdot 48 - 207,66 = 47,76 > 0.$$

б) Условие извлечения раската с оправки

Для последнего чистового калибра условие извлечение раската с оправки запишется в виде:

$$g_{6(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) = g_{3(i)}(1,09; 1,09) = 220 - 207,66 = 12,34 > 0$$

Полученные значения углов охвата оправки удовлетворяют требованиям (41), (42), следовательно, величина овальности чистовых калибров равная 1,09 обеспечивает процесс раскатки труб без образования разрывов на наружной поверхности и обеспечивает беспрепятственное извлечение раската с оправки.

На основании проведенного анализа следует, что при использовании чистовых калибров с величиной овальности 1,09 обеспечивается стабильное и



безаварийное протекание процесса раскатки, отвечающее требованиям параметров системы ограничений.

### **Окрестность точки начального приближения**

После определения критерия оптимизации и расчета параметров системы ограничений осуществляется анализ окрестности точки начального приближения  $D^{(0;0)}(1,09; 1,09)$  в соответствии с условиями, приведенными на рисунке 27.

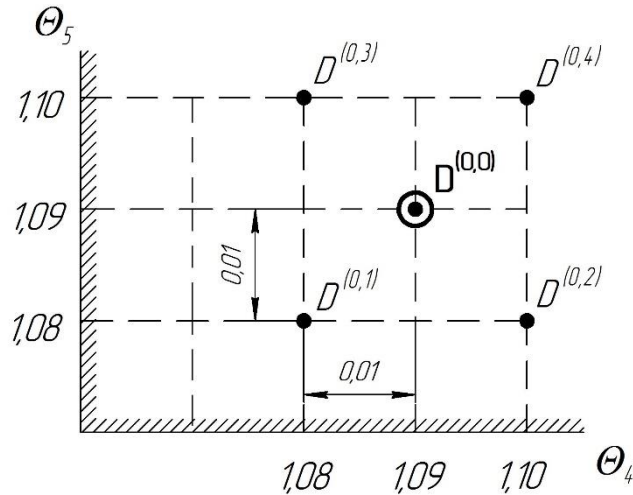


Рисунок 27 – Окрестность точки начального приближения

Геометрические параметры калибровки валков предпоследнего и последнего чистового калибра для каждой точки, входящей в окрестность точки начального приближения  $D^{(0;0)}(1,09; 1,09)$ , определяются с использованием разработанной ранее в п. 2.2.2 методики. Результаты расчета представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Параметры калибровки валков

Параметр калибровки	Окрестность точки начального приближения $D^{(0;0)}$							
	$D^{(0;1)}$		$D^{(0;2)}$		$D^{(0;3)}$		$D^{(0;4)}$	
	$i-1$	$i$	$i-1$	$i$	$i-1$	$i$	$i-1$	$i$
Овальность	1,08	1,10	1,08	1,08	1,10	1,10		
Половина ширины калибра, мм	207,36	211,20	207,36		211,20			
Радиус выпуска, мм	438,928	617,567	438,928		617,567			
Координаты радиуса выпуска	ох	-123,47	-212,78	-123,47	-212,78			
	оу	-213,85	-368,55	-213,85	-368,55			

Для каждой точки окрестности, соответствующей исследуемой величине овальности, проводится компьютерное моделирование, определяющее форму

поперечного сечения раската в программном продукте Deform-3D и осуществляется расчет критерия оптимизации в соответствии с формулами:

$$D^{(0,1)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} - 0,01; \Theta_i^{(0,0)} - 0,01) = D^{(0,1)}(1,08; 1,08) = 0,0533 \cdot 1,994 \cdot 100 = 10,63\% ;$$

$$D^{(0,2)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} + 0,01; \Theta_i^{(0,0)} - 0,01) = D^{(0,2)}(1,10; 1,08) = 0,0587 \cdot 1,994 \cdot 100 = 11,70\% ;$$

$$D^{(0,3)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} - 0,01; \Theta_i^{(0,0)} + 0,01) = D^{(0,3)}(1,08; 1,10) = 0,0542 \cdot 1,994 \cdot 100 = 10,81\% ;$$

$$D^{(0,4)}(\Theta_{i-1}^{(0,0)} + 0,01; \Theta_i^{(0,0)} + 0,01) = D^{(0,4)}(1,10; 1,10) = 0,0658 \cdot 1,994 \cdot 100 = 13,13\% .$$

Далее, с учетом варьирования факторов, приведенных в таблице 5, система уравнений регрессии записывается в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 - a_1 \cdot 1,08 - a_2 \cdot 1,08 + a_{12} \cdot 1,10 \cdot 1,10 = 10,63 ; \\ a_0 + a_1 \cdot 1,10 - a_2 \cdot 1,08 + a_{12} \cdot 1,08 \cdot 1,08 = 11,70 ; \\ a_0 - a_1 \cdot 1,08 - a_2 \cdot 1,10 + a_{12} \cdot 1,08 \cdot 1,08 = 10,81 ; \\ a_0 + a_1 \cdot 1,10 + a_2 \cdot 1,10 + a_{12} \cdot 1,10 \cdot 1,10 = 13,13 . \end{array} \right.$$

Решение системы уравнений реализовано в программе Mathcad:

$$\text{Find}(a_0, a_1, a_2, a_{12}) \rightarrow \begin{pmatrix} 11.550298647711672424 \\ \underline{0.77752293577981651376} \\ \underline{0.36926605504587155963} \\ 0.26300286147113280592 \end{pmatrix}$$

Далее осуществляется снижение величины овальности предпоследнего ( $i-1$ ) калибра с шагом 0,02. Снижение величины овальности последнего ( $i$ ) калибра пересчитывается по уравнению, обеспечивающему изменение управляющих параметров в направлении вектора градиента ( $grad D$ ):

$$\Delta\Theta_i = \frac{\Delta\Theta_{i-1} \cdot a_2}{a_1} = \frac{0,02 \cdot 0,369}{0,778} \approx 0,01 .$$

Таким образом, получаем новую точку начального приближения и направление вектора градиента:

$$D^{(1,0)}(\Theta_{i-1} - \Delta\Theta_{i-1}; \Theta_i - \Delta\Theta_i) = D^{(1,0)}(1,09 - 0,02; 1,09 - 0,01);$$

$$D^{(1,0)}(1,07; 1,08).$$

Переход по градиенту к новой точке представлен на рисунке 28.

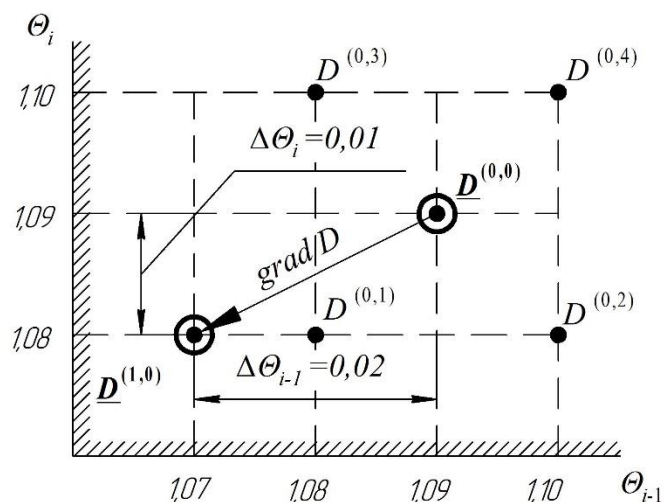


Рисунок 28 – Спуск по градиенту, новая точка начального приближения

После перехода к новой точке начального приближения  $D^{(1,0)}$  на первом шаге осуществляется расчет системы ограничений с целью определения правильности выбранного направления, и далее осуществляется аналогичная процедура, что и в точке начального приближения  $D^{(0,0)}$ . Если выбранное направление (точка) не удовлетворяет параметрам системы ограничений, то осуществляется откат точки с шагом 0,01 на предшествующую позицию и выбирается новое направление, обеспечивающее минимум целевой функции.

Расчет параметров системы ограничений осуществлялся в автоматическом режиме, алгоритм которого реализован в приложении Mathcad.

### 2.3 Результаты оптимизации

Последовательное решение оптимизационной задачи, в соответствии с разработанным алгоритмом, позволило на 5-м шаге определить оптимальную величину овальности калибров чистовых клеток непрерывного 3-валкового

раскатного стана. Перемещение точки в двухмерном фазовом пространстве представлено на рисунке 29.

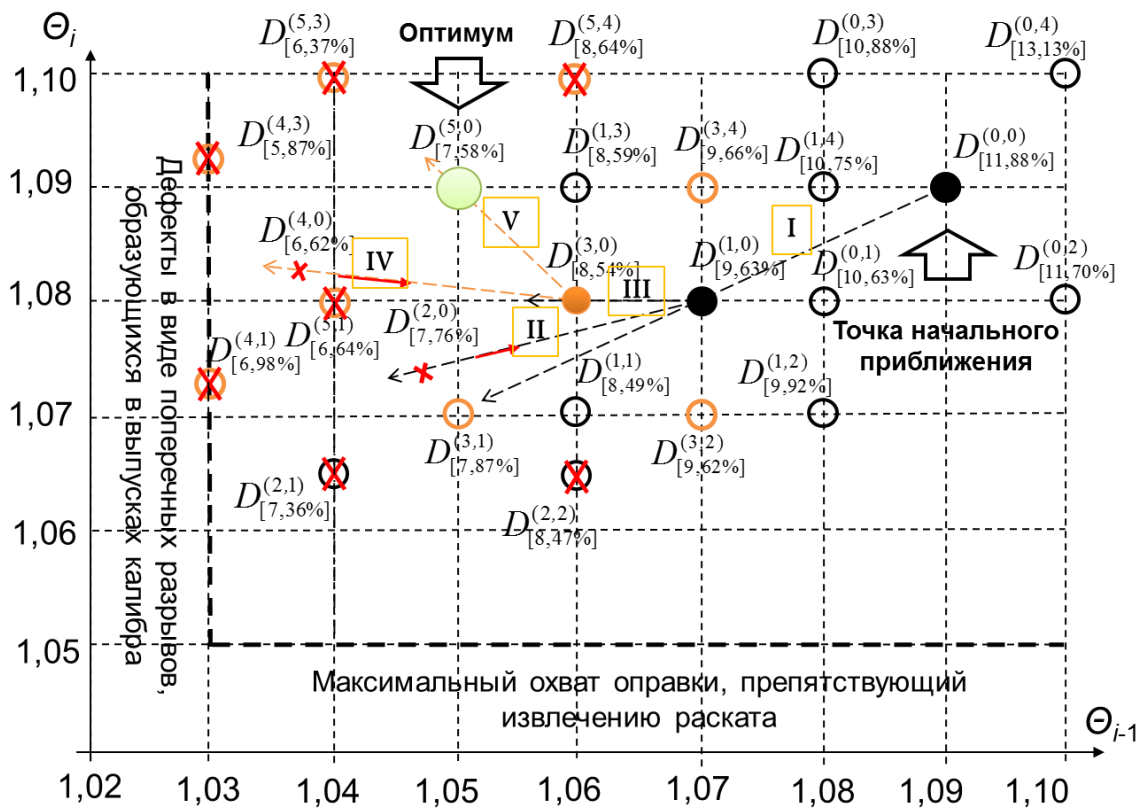


Рисунок 29 – Двухмерное фазовое пространство  $\Theta_{i-1}\Theta_i$

Результаты расчета параметров системы ограничений для каждой исследуемой точки фазового пространства сведены в таблицу 11, в которой:

- зеленым цветом отмечены точки, соответствующие минимуму целевой функции;
- оранжевым, отмечены ячейки, не удовлетворяющие параметрам системы ограничений;
- синим, отмечены точки, соответствующие оптимуму целевой функции.

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что оптимальным решением, обеспечивающим минимум доверительного интервала изменения толщины стенки раската, является снижение величины овальности калибра в предпоследней клетке непрерывного 3-валкового раскатного стана.

Таблица 11 – Результаты решения оптимизационной задачи

Шаг оптимизации			0					I					II					
Точка фазового пространства $\Theta_{i-1}\Theta_i$			$D^{(0,0)}$	$D^{(0,1)}$	$D^{(0,2)}$	$D^{(0,3)}$	$D^{(0,4)}$	$D^{(1,0)}$	$D^{(1,1)}$	$D^{(1,2)}$	$D^{(1,3)}$	$D^{(1,4)}$	$D^{(2,0)}$	$D^{(2,1)}$	$D^{(2,2)}$	$D^{(2,3)}$	$D^{(2,4)}$	
Величина овальности калибра:	предпоследнего	$i-1$	1,090	1,080	1,100	1,080	1,100	1,070	1,060	1,080	1,060	1,080	1,050	1,040	1,060	1,040	1,060	
	последнего	$i$	1,090	1,080	1,080	1,100	1,100	1,080	1,070	1,070	1,090	1,090	1,075	1,065	1,065	1,085	1,085	
Значение критерия оптимизации, %:																		
Система ограничений:			11,88	10,63	11,70	10,81	13,13	9,63	8,49	9,92	8,59	10,75	7,76	7,34	8,46	6,61	8,56	
№	Параметр	Условие																
1.	Первичный захват	$i-1$	$g_{1(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,010	0,021	0,011	0,021	0,011	0,032	0,043	0,021	0,043	0,021	0,055	0,072	0,043	0,072	0,043
		$i$	$g_{1(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,104	0,106	0,106	0,101	0,101	0,106	0,109	0,109	0,109	0,109	0,109	0,108	0,111	0,111	0,111
2.	Вторичный захват	$i-1$	$g_{2(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,074	0,072	0,075	0,072	0,075	0,071	0,070	0,072	0,070	0,072	0,068	0,066	0,070	0,066	0,070
		$i$	$g_{2(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,120	0,116	0,123	0,123	0,123	0,112	0,108	0,108	0,108	0,108	0,103	0,096	0,096	0,096	0,096
3.	Заполнение межклетевого промежутка	$i-1$	$g_{3(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,017	0,014	0,020	0,014	0,020	0,011	0,008	0,020	0,008	0,020	0,004	-0,0001	0,008	-0,0001	0,008
		$i$	$g_{3(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,139	0,139	0,138	0,141	0,142	0,135	0,134	0,132	0,132	0,138	0,134	0,131	0,135	0,138	0,138
4.	Предельная овальность	$i-1$	$g_{4(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,045	0,035	0,055	0,035	0,055	0,025	0,015	0,035	0,015	0,035	0,005	-0,005	0,015	-0,005	0,015
		$i$	$g_{4(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,045	0,035	0,035	0,055	0,055	0,035	0,025	0,025	0,025	0,045	0,045	0,030	0,020	0,020	0,040
5.	Предельный угол охвата	$i-1$	$g_{5(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	33,8	29,8	44,6	29,8	44,6	21,8	13,4	29,8	13,4	29,8	4,6	-4,8	13,4	-4,8	13,4
		$i$	$g_{5(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	47,7	42,2	44,7	52,7	54,3	37,3	35,2	41,8	46,2	43,8	34,2	27,5	36,2	44,1	47,1
6.	Извлечение раската	$i$	$g_{6(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	12,3	6,8	8,7	16,7	18,8	1,3	-0,7	5,8	10,8	7,8	-1,7	-8,45	0,78	8,13	11,7

Шаг оптимизации				III					IV				V					
Точка фазового пространства $\Theta_{i-1}\Theta_i$				$D^{(3,0)}$	$D^{(3,1)}$	$D^{(3,2)}$	$D^{(3,3)}$	$D^{(3,4)}$	$D^{(4,0)}$	$D^{(4,1)}$	$D^{(4,2)}$	$D^{(4,3)}$	$D^{(4,4)}$	$D^{(5,0)}$	$D^{(5,1)}$	$D^{(5,2)}$	$D^{(5,3)}$	$D^{(5,4)}$
Величина овальности калибра:		предпоследнего	$i-1$	<u>1,060</u>	<u>1,050</u>	<u>1,070</u>	<u>1,050</u>	<u>1,070</u>	<u>1,040</u>	<u>1,030</u>	<u>1,050</u>	<u>1,030</u>	<u>1,050</u>	<u>1,050</u>	<u>1,040</u>	<u>1,060</u>	<u>1,040</u>	<u>1,060</u>
		последнего	$i$	<u>1,080</u>	<u>1,070</u>	<u>1,070</u>	<u>1,090</u>	<u>1,090</u>	<u>1,082</u>	<u>1,072</u>	<u>1,072</u>	<u>1,092</u>	<u>1,092</u>	<u>1,090</u>	<u>1,080</u>	<u>1,080</u>	<u>1,100</u>	<u>1,100</u>
<b>Значение критерия оптимизации:</b>																		
<b>Система ограничений:</b>				<b>8,54</b>	<b>7,87</b>	<b>9,62</b>	<b>7,58</b>	<b>9,66</b>	<b>6,62</b>	<b>6,98</b>	<b>7,81</b>	<b>5,87</b>	<b>9,72</b>	<b>7,58</b>	<b>6,60</b>	<b>8,71</b>	<b>6,52</b>	<b>8,84</b>
№	Параметр		Условие															
1.	Первичный захват	$i-1$	$g_{1(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,043	0,055	0,032	0,055	0,032	0,072	0,081	0,055	0,081	0,055	0,055	0,072	0,043	0,072	0,043
		$i$	$g_{1(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,106	0,109	0,109	0,104	0,104	0,111	0,109	0,109	0,103	0,103	0,104	0,104	0,111	0,109	0,101
2.	Вторичный захват	$i-1$	$g_{2(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,070	0,068	0,071	0,068	0,071	0,066	0,065	0,068	0,065	0,068	0,068	0,066	0,070	0,066	0,070
		$i$	$g_{2(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,096	0,096	0,112	0,112	0,112	0,096	0,069	0,096	0,094	0,094	0,112	0,112	0,096	0,108	0,120
3.	Заполнение межклетевого промежутка	$i-1$	$g_{3(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,008	0,004	0,011	0,004	0,004	-0,0001	-0,025	0,004	-0,003	0,004	0,004	-0,0001	0,008	0,138	0,008
		$i$	$g_{3(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,136	0,134	0,135	0,138	0,138	0,138	0,132	0,134	0,130	0,138	0,138	0,138	0,132	0,138	0,138
4.	Предельная овальность	$i-1$	$g_{4(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,015	0,005	0,025	0,005	0,025	-0,005	-0,015	0,005	-0,015	0,005	0,005	-0,005	0,015	-0,005	0,015
		$i$	$g_{4(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	0,035	0,025	0,025	0,045	0,045	0,040	0,027	0,025	0,047	0,045	0,045	0,040	0,045	0,055	0,055
5.	Предельный угол охвата	$i-1$	$g_{5(i-1)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	13,4	4,6	21,8	4,6	21,8	-4,8	-14,7	4,6	-14,7	4,6	4,6	-4,8	13,4	-4,8	13,4
		$i$	$g_{5(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	47,3	35,4	35,7	44,9	43,7	44,1	30,4	35,4	28,4	44,9	44,9	44,1	46,2	45,4	47,4
6.	Извлечение раската	$i$	$g_{6(i)}(\Theta_{i-1}; \Theta_i) > 0$	11,9	0,02	0,28	9,02	8,3	8,13	-5,02	-1,7	-3,02	9,02	9,02	8,13	10,8	9,9	11,8

Таким образом, резервы совершенствования технологии раскатки в чистовых калибрах, способствующие повышению точности труб по толщине стенки, определяются предпоследней чистовой клетью. Физический смысл полученных результатов объясняется тем, что при прокатке в предпоследнем чистовом калибре с меньшей величиной овальности обеспечивается лучшая проработка толщины стенки в зоне выпуска калибра, а разработанная система ограничений способствует стабильному протеканию процесса. Далее, при деформации в последнем чистовом калибре с большей величиной овальности и меньшим обжатием по толщине стенки, обеспечивается, необходимый для снятия раската с оправки, угол охвата.

#### **2.4 Выводы по главе**

1. Снижение величины овальности калибра и параметра тонкостенности раскатываемых труб способствует увеличению угла охвата оправки. Увеличение угла охвата оправки обусловлено меньшим уширением раската во внеконтактной зоне калибра, что также является следствием меньшего обжатия толщины стенки в вершине калибра;

2. С точки зрения снижения рисков образования поперечных разрывов для сортамента труб с отношением  $D/S$  от 15 до 50, минимальная овальность калибра регламентируется диапазоном от 1,03 до 1,048.

3. Прокатка в калибре с величиной овальности менее 1,06, отношением  $D/S$  патрубка менее 24,7 и относительном обжатии менее 0,06 способствует формированию подрезов, образующихся в выпусках калибра.

4. С точки зрения стабильного заполнения межклетевого промежутка овальность калибра, при относительном обжатии толщины стенки более 0,06, регламентируется величиной 1,035.

5. Деформацию раската в чистовых калибрах при коэффициенте вытяжки менее 1,183 сопровождается утолщением стенки в выпуске калибра, при большем значении коэффициента вытяжки – утоняется.

6. Оптимальным решением, с точки зрения повышения точности и стабильности протекания процесса прокатки является снижение овальности калибра в предпоследней клетке непрерывного 3-валкового раскатного стана.

### **3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ТРУБ В ЧИСТОВЫХ КЛЕТЯХ СТАНА**

#### **3.1 Постановка задачи физического моделирования**

Для проверки результатов, полученных при решении оптимизационной задачи, целесообразно провести исследование характера формоизменения раската на основе физического моделирования с использованием систем калибров, имеющих:

- калибровку валков в последних двух (чистовых) калибрах с равной величиной овальности;
- оптимальную калибровку валков с овальностью предпоследнего чистового калибра меньшей овальности последнего на величину 4,0 %.

#### **3.2 Применяемое оборудование, материалы и инструмент**

Физическое моделирование процесса раскатки полых заготовок на оправке осуществлялось в условиях ОАО «РосНИТИ» на лабораторном прокатном стане, имеющем клеть с 3-валковым калибром. Общий вид лабораторного стана с 3-валковой клетью представлен на рисунке 30.



Рисунок 30 – Лабораторный прокатный стан



Для привода валков клетки используется только один шпиндель, передача крутящего момента осуществляется через конические шестерни. Общий вид валкового узла приведен на рисунке 31. При выставлении калибра межвалковый зазор контролируется с использованием набора прямых удлиненных щупов. Регулировка валков в боковом направлении осуществляется путем установки подкладок требуемой толщины под посадочные плоскости каждого валка.



Рисунок 31 – Общий вид валкового узла

Технические характеристики оборудования лабораторного стана с 3-валковой клетью представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Технические характеристики лабораторного стана

№	Параметр	Ед. измерения	Величина
1	Двигатель:		4A160
	– тип		M4У3/M100
	– мощность;	кВт	18,5
	– частота вращения вала;	об/мин	1500
	– напряжение питания	В	380
2	Условный диаметр валков	мм	170
3	Ширина валка	мм	40
4	Максимальное усилие прокатки	кН	80
5	Максимальный крутящий момент на валке	кНм	2,5

6	Скорость прокатки	м/с	0...0,21
7	Габариты блока	мм	2290×1111×1173

Раскатка заготовок осуществляется в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 32. Геометрические параметры калибровки валков определяются в соответствии с таблицей 13.

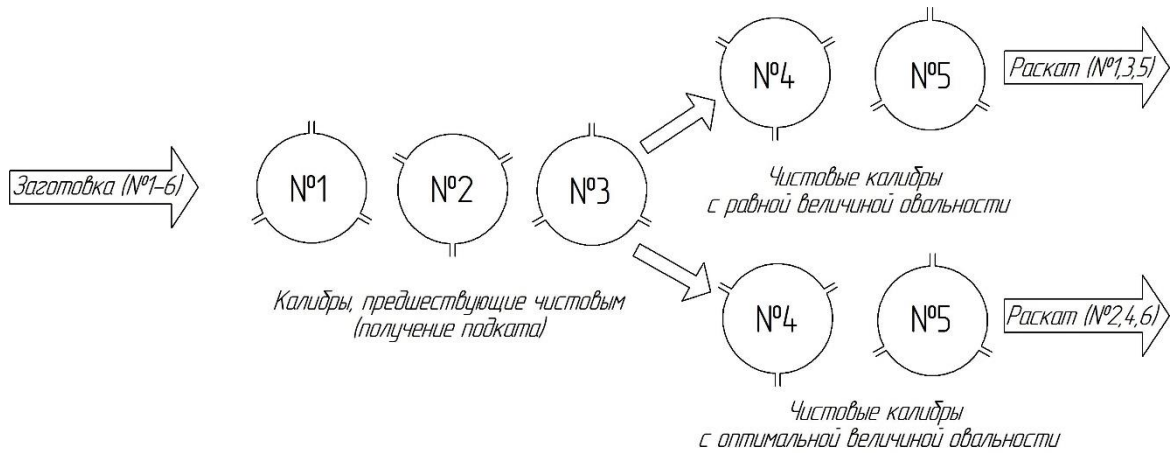


Рисунок 32 – Схема раскатки заготовок

Геометрические параметры исходной заготовки и оправки представлены на рисунках 33 и 34 соответственно.

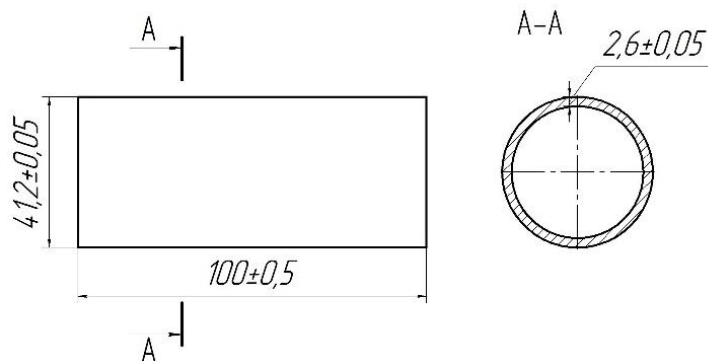


Рисунок 33 – Геометрические параметры исходной заготовки (гильзы)

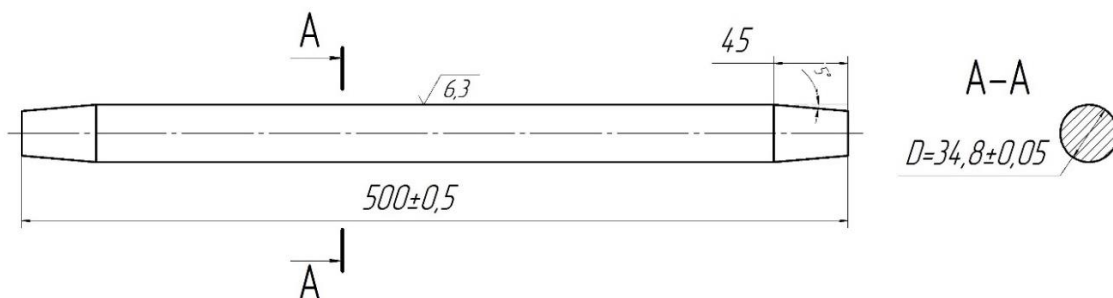


Рисунок 34 – Геометрические параметры оправки



В качестве модельного материала образцов, имитирующего прокатку нагретой стали, используется свинец марки С1 [133], который также исключает фактор влияния неравномерного нагрева на результаты эксперимента. Свинцовые патрубки получены путем расплавления свинцового лома марки С1 с последующей разливкой в специальную форму (рисунок 35).



Рисунок 35 – Отливка свинцовой заготовки

После затвердевания свинца в специальной форме осуществляется его извлечение и последующая расточка на токарном станке до заданных геометрических параметров, приведенных на рисунке 33. Общий вид сплошной и полый заготовки (гильзы) представлены на рисунке 36.



Рисунок 36 – Сплошная и полая заготовка

### 3.3 План проведения эксперимента

Прокатка полых заготовок осуществлялась с тройной кратностью повторения опытов в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 32. Для эксперимента подготовлено 6 полых заготовок с геометрическими параметрами, приведенными на рисунке 33. Перед прокаткой, для снижения трения между оправкой и внутренней поверхностью патрубка, на поверхность оправки наносится графитовая смазка.

Прокатка осуществлялась с частотой вращения валков для каждого прохода, равной 5,0 об/мин. Прокатка в калибрах с номерами 1, 2 и 3 и геометрическими параметрами, приведенными в таблице 13, осуществляется для всех шести полых заготовок. После третьего прохода каждому раскатанному патрубку присваивается порядковый номер (1, 2...6). Далее патрубки сортируются: нечетные (1, 3 и 5) раскатываются в чистовых калибрах с равной величиной овальности, а четные (2, 4, 6) раскатываются в чистовых калибрах с оптимальной величиной овальности.

### 3.4 Порядок и схема проведения измерений

При раскатке патрубков в чистовых калибрах после каждого прохода осуществляется обрезка некондиционного переднего (ПК) и заднего (ЗК) концов раската. Далее из каждого раскатанного патрубка выпиливается образец длиной не более 45 мм в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 37.

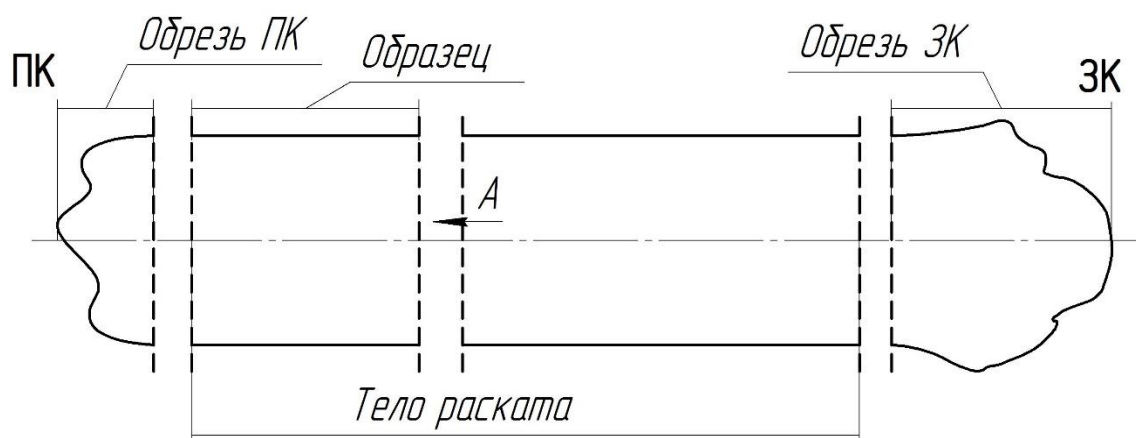


Рисунок 37 – Схема обработки готового раската

Поперечное сечение каждого выпиленного образца (рисунок 38а), со стороны которого осуществляется измерение толщины стенки, зачищается на шлифовально-полировальном станке MetaServ 250. Далее поперечное сечение образца сканируется (рисунок 38б) для получения изображения высокой четкости и загружается в приложение Компас-2D для последующей обработки.

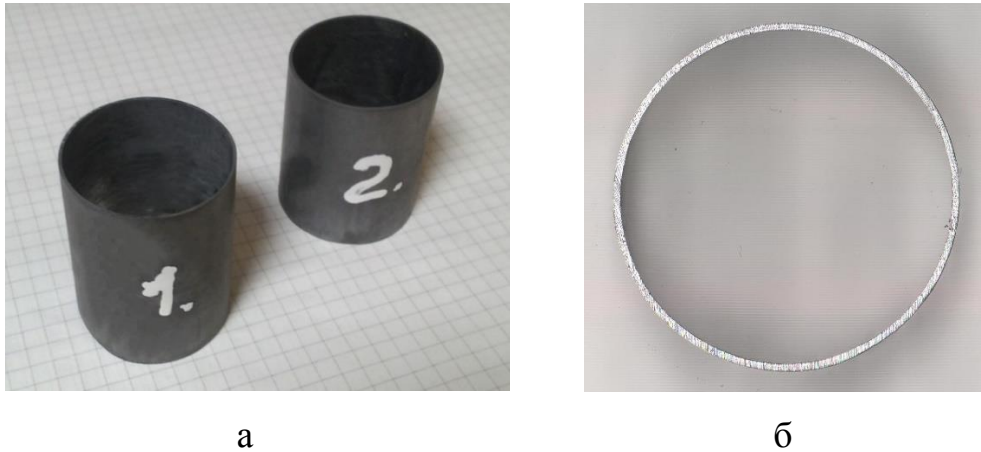


Рисунок 38 – Готовые образцы:

а – общий вид; б – скан поперечного сечения

Толщина стенки измеряется в поперечном сечении А (рисунок 37) в 72 точках, ориентированных относительно центра калибра в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 34 в п. 2.2.2. Толщины соответствующих стенок раската усредняются, например, толщина стенки в вершине калибра, приведенная на рисунке 22 в п. 2.2.2, усредняется в точках S1, S25 и S49 для каждого из трех патрубков соответствующей системе калибров. По завершению измерений рассчитывается поле распределения толщины стенки раската для каждой системы калибров.

### 3.5 Результаты экспериментального исследования

В таблице 16 приведены результаты измерений толщины стенки раската, усредненных относительно трех раскатанных патрубков для каждой системы калибров на выходе раската из предпоследнего и последнего чистового калибра.

Таблица 14 – Результаты измерений

Поперечное сечение раската	Чистовые калибры			
	Равная величина овальности		Оптимальная овальность	
	№ 4	№ 5	№ 4	№ 5
	<b>1,09</b>	<b>1,09</b>	<b>1,06</b>	<b>1,09</b>
1-5	0,78	0,78	0,78	0,78
6	0,79	0,79	0,79	0,79
7	0,81	0,76	0,81	0,75
8	0,82	0,74	0,82	0,78
9	0,76	0,75	0,81	0,76
10	0,80	0,75	0,82	0,77
11	0,80	0,77	0,80	0,76
12	0,81	0,79	0,77	0,76
13	0,84	0,83	0,81	0,81
14	0,81	0,79	0,77	0,76
15	0,80	0,77	0,80	0,76
16	0,80	0,75	0,82	0,77
17	0,76	0,75	0,81	0,76
18	0,82	0,74	0,82	0,78
19	0,81	0,76	0,81	0,75
20	0,79	0,79	0,79	0,79
21-29	0,78	0,78	0,78	0,78
30	0,79	0,79	0,79	0,79
31	0,81	0,76	0,81	0,75
32	0,82	0,74	0,82	0,78
33	0,76	0,75	0,81	0,76
34	0,80	0,75	0,82	0,77
35	0,80	0,77	0,80	0,76
36	0,81	0,79	0,77	0,76
37	0,84	0,83	0,81	0,81
38	0,81	0,79	0,77	0,76
39	0,80	0,77	0,80	0,76
40	0,80	0,75	0,82	0,77
41	0,76	0,75	0,81	0,76
42	0,82	0,74	0,82	0,78
43	0,81	0,76	0,81	0,75
44	0,79	0,79	0,79	0,79
45-53	0,78	0,78	0,78	0,78
54	0,79	0,79	0,79	0,79
55	0,81	0,76	0,81	0,75
56	0,82	0,74	0,82	0,78
57	0,76	0,75	0,81	0,76

58	0,80	0,75	0,82	0,77
59	0,80	0,77	0,80	0,76
60	0,81	0,79	0,77	0,76
61	0,84	0,83	0,81	0,81
62	0,81	0,79	0,77	0,76
63	0,80	0,77	0,80	0,76
64	0,80	0,75	0,82	0,77
65	0,76	0,75	0,81	0,76
66	0,82	0,74	0,82	0,78
67	0,81	0,76	0,81	0,75
68	0,79	0,79	0,79	0,79
69-72	0,78	0,78	0,78	0,78
<b>Макс., мм</b>	<b>0,84</b>	<b>0,83</b>	<b>0,82</b>	<b>0,81</b>
<b>Мин., мм</b>	<b>0,76</b>	<b>0,74</b>	<b>0,77</b>	<b>0,75</b>
<b>Сред. знач., мм</b>	<b>0,79</b>	<b>0,77</b>	<b>0,79</b>	<b>0,77</b>
<b><math>\Delta S</math>, %</b>	<b>10,08</b>	<b>11,64</b>	<b>6,30</b>	<b>7,75</b>

Из анализа результатов, приведенных в таблице 14, следует, что при раскатке в чистовых калибрах с оптимальной величиной овальности поле распределения толщины стенки раската на выходе из предпоследнего (№4) и последнего (№5) чистового калибра в среднем снизилось в 1,5 раза. При раскатке с равной величиной овальности максимальное отклонение толщины стенки зафиксировано на выходе раската из предпоследнего чистового калибра в плюсовом поле допуска, при этом максимальное отклонение толщины стенки на выходе раската из последнего чистового калибра зафиксировано в минусовом поле допуска. Максимальное отклонение толщины стенки в предпоследнем чистовом калибре обусловлено большим утолщением стенки по линии разъема валков, вследствие большей величины овальности чистового калибра.

При анализе характера распределения толщины стенки, приведенном на рисунках 39, 40 выявлено, что при равной величине овальности чистовых калибров толщина стенки в зоне отрыва раската от оправки получает некоторое утонение от номинальной толщины. При этом, как было отмечено выше, 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 возникающих растягивающих напряжений в выпуске калибра, следовательно, чем меньше угол охвата оправки и больше величина продольных растягивающих напряжений, тем больше стенка подвержена изменению.

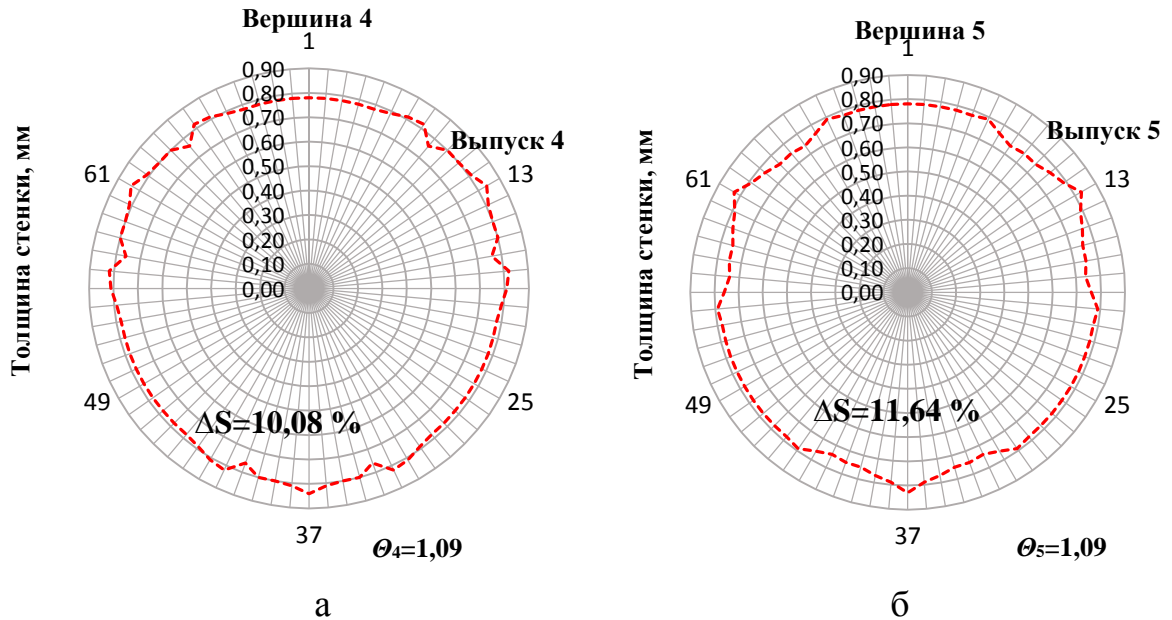


Рисунок 39 – Характер распределения толщины стенки раската после:  
а – четвертого прохода (1,09); б – пятого прохода (1,09)

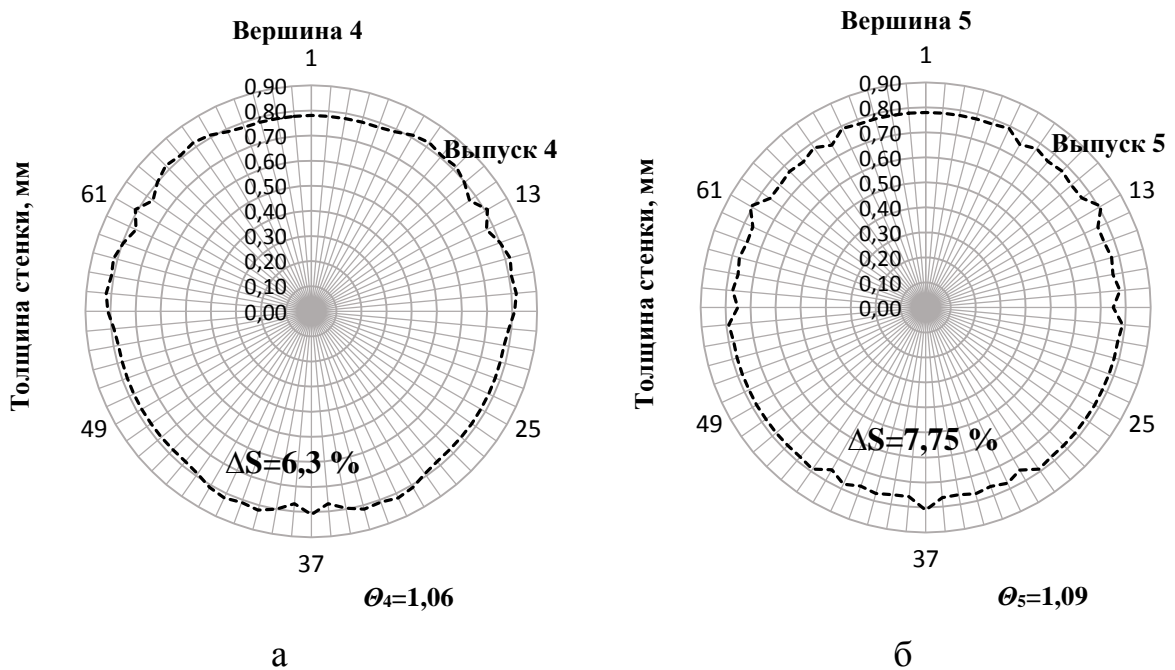


Рисунок 40 – Характер распределения толщины стенки раската после:  
а – четвертого прохода (1,06); б – пятого прохода (1,09)

Прокатка в калибрах с оптимальной величиной овальности сопровождается утонением стенки по линии разъема калибра после каждого прохода на 3,5 и 2,4 % соответственно, в сравнении с прокаткой в калибрах с равной величиной овальности. Таким образом, 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. Также, следует отметить, что поле распределения толщины стенки на выходе раската из предпоследнего чистового калибра имеет меньшую величину, чем на выходе раската из последнего. Следовательно, можно предположить, что использование непрерывных раскатных станов с четным количеством клетей, с точки зрения характера распределения толщины стенки, перспективнее.

Сопоставление результатов физического моделирования и оптимизационной задачи для величин овальности чистовых калибров, соответствующих точке начального приближения и оптимальной, представлено на рисунке 41.



Рисунок 41 – Поле распределения толщины стенки

Таким образом, полученные результаты характера распределения толщины стенки при физическом моделировании подтверждают корректность результатов решения оптимизационной задачи, полученных с использованием разработанной методики по определению оптимальной величины овальности чистовых калибров.

### **3.6 Выводы по главе**

Исследование характера формоизменения и напряженного состояния раската на основе физического и компьютерного моделирования, с использованием систем калибров, имеющих калибровку валков в последних двух (чистовых) калибрах с равной величиной овальности и рассчитанную оптимальную калибровку, то есть с величиной овальности предпоследнего чистового калибра меньшей последнего на величину 4,0 %, позволило сделать следующие выводы:

1. Использование оптимальной калибровки валков в чистовых калибрах позволяет повысить точность раската за непрерывным раскатным станом не менее чем в 1,5 раза, что свидетельствует о корректности результатов, полученных с использованием разработанной методики расчета.

2. Прокатка в калибрах с рассчитанной оптимальной величиной овальности сопровождается утонением стенки по линии разъема калибра после каждого прохода на 3,5 и 2,4 % соответственно, в сравнении с прокаткой в калибрах с равной величиной овальности, что способствует более равномерному распределению толщины стенки в поперечном сечении раската.

## **4 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

Результаты теоретического, компьютерного и физического исследования процесса продольной прокатки труб в чистовых 3-валковых клетях раскатных станов позволили разработать алгоритм и методику расчета оптимальной величины овальности чистовых калибров с учетом особенностей и ограничений параметров процесса раскатки. В данной связи, с целью определения достоверности результатов, получаемых с использованием разработанной методики, а также её адаптации, требуется осуществить опытно-промышленное сопоставление в условиях реального производства.

### **4.1 Исследование характера формоизменения раската в чистовых 3-валковых калибрах**

Оценка результатов расчёта параметров процесса прокатки, полученных с использованием разработанной методики расчета, была проведена в марте 2016 г. 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 передельных труб с использованием данной системы калибров используется гильза наружным диаметром 433 мм с толщиной стенки 26,9 мм. Калибры чистовых клеток стана FQM имеют идентичную калибровку валков, овальность которых соответствует величине равной 1,09. Относительное обжатие по вершине чистовых калибров, в соответствии с настроечными параметрами стана, соответствует величине 30,2 % для 4 клетки и 6,04 % для 5 клетки. Коэффициент вытяжки для 4 и 5 клетки равен соответственно 1,079 и 1,03.

В процессе извлечения и калибрования труб на стане-извлекателе и калибровочном стане стенка по периметру поперечного сечения раската претерпевает некоторое утолщение. Вследствие этого, прокатку данного типоразмера труб на стане FQM осуществляют с получением толщины стенки на

0,3-0,5 мм меньше номинальной толщины стенки готовой трубы. При этом параметр тонкостенности раската за станом FQM соответствует критической величине равной 49,5. Соответственно, использование данной системы калибров с точки зрения освоения новых видов продукции, в частности уменьшения толщины стенки раскатываемых труб до 7,0 мм, чревато возникновением аварийных ситуаций и появлением дефектов прокатного происхождения на передельных трубах. С другой стороны, совершенствование технологии за счет оптимальных геометрических параметров чистовых калибров позволит использовать не задействованные резервы данной системы с большим выходом годного.

На первом этапе апробации разработанной методики расчета был проведен анализ характера формоизменения раската в чистовых калибрах, в частности, распределения толщины стенки по периметру поперечного сечения раската и угла охвата оправки в очаге деформации (ОД). Для этого был исследован недокат, образовавшийся во всех клетях стана FQM (рисунок 42).



а

б

Рисунок 42 – Недокат, образовавшийся во всех клетях стана FQM  
а – общий вид; б – очаг деформации чистовых клетей №№ 4, 5 (S4 и S5)

Измерение толщины стенки недоката осуществлялось в 72 точках по периметру поперечного сечения на выходе из чистовых клетей стана с использованием ультразвукового толщиномера УТ93П №66 в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 43. Для определения угла охвата оправки на недокате размечались области, соответствующие охвату  $l_\varphi$  и отрыву  $l_\psi$  раската от

оправки в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 44. Далее, с использованием измерительной рулетки, определялась длина, соответствующая отрыву раската от оправки со стороны каждого из 3-х валков и средний диаметр раската на выходе из 4 и 5 клеток стана. На основании полученных результатов, путем пересчета определялся угол охвата оправки.

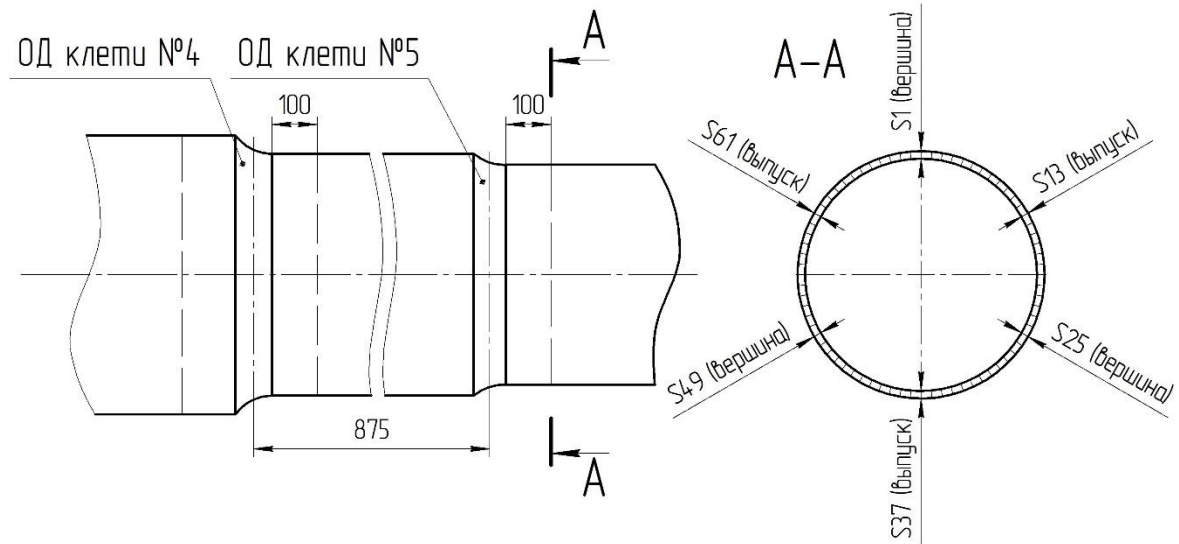


Рисунок 43 – Схема измерения толщины стенки недоката на выходе из чистовых калибров

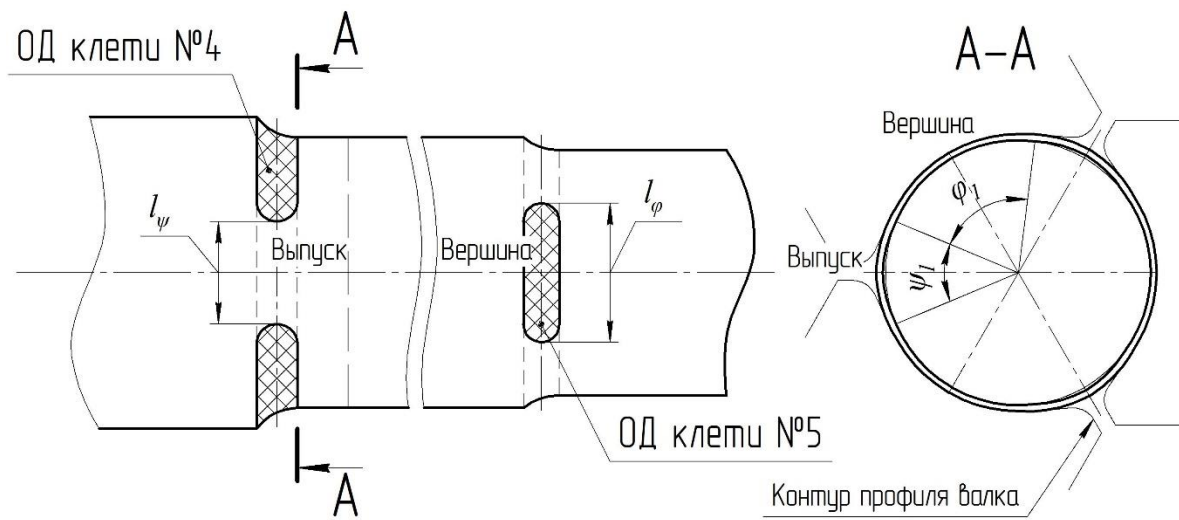


Рисунок 44 – Схема измерения угла охвата оправки

На первом шаге проведен анализ результатов измерений толщины стенки в 72 точках и определены значения максимальной, минимальной и средней толщины стенки по периметру поперечного сечения на выходе раската из 4 и 5 клетки стана. По полученным результатам определена фактическая величина относительной

разнотолщинности стенки раската в чистовых калибрах. Результаты приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Толщина стенки раската

№ Клетей	Толщина стенки, мм			Относительная разнотолщинность, %
	Макс.	Мин.	Средняя	
4	8,0	7,2	7,7	10,4
5	8,3	7,3	7,8	12,8

Величины соответствующих толщин стенок усреднялись со стороны каждого вала и строились лепестковые диаграммы характера распределения толщины стенки на выходе раската из 4 и 5 клетки стана. Результаты представлены на рисунке 45.

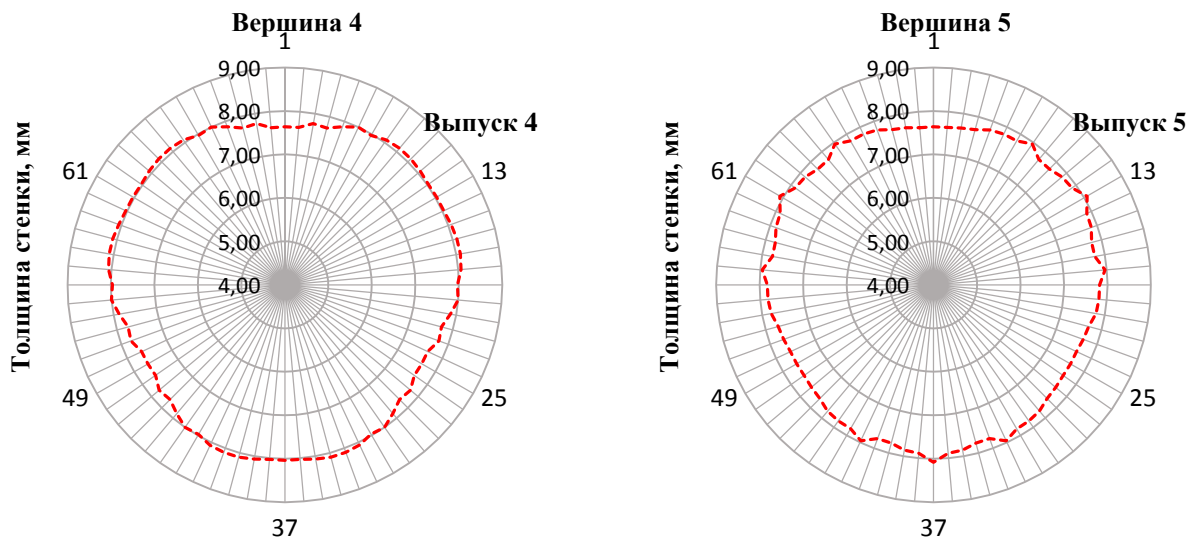


Рисунок 45 – Распределение толщины стенки по периметру поперечного сечения раската на выходе из: а – 4 клетки; б – 5 клетки

Из анализа результатов, приведенных на рисунке 45 следует, что поперечная разнотолщинность стенки раската на выходе из 4 клетки стана имеет меньшую величину, толщина стенки в выпусках калибра распределяется равномернее и утолщается относительно вершины этого же калибра. Поперечная разнотолщинность стенки на выходе раската из 5 клетки стана имеет большую

величину вследствие того, что толщина стенки по выпуску калибра распределяется не однородно.

По результатам, проведенного ранее, компьютерного моделирования технологии раскатки гильз с использованием стана с 3-валковыми клетями, имеющего калибры чистовых клетей с величиной овальности равной 1,09, определено, что характер распределения толщины стенки раската на выходе из предпоследней и последней клетки стана качественно и количественно сопоставляется с результатами промышленного исследования. Относительная разнотолщинность стенки раската после последней и предпоследней клетки соответствует величинам равным 10,1% и 11,7% соответственно. Погрешность расчета, при определении относительной разнотолщинности стенки раската, полученной на основе разработанной методики при сопоставлении с промышленными данными недоката, не превышает 10,0 %:

$$\Delta_{расч} = 1 - \frac{\Delta S_{\%}^{км}}{\Delta S_{\%}^{нд}} = 1 - \frac{11,7}{12,8} \cdot 100 = 8,6\% . \quad (73)$$

Таким образом, проведенное исследование позволяет подтвердить корректность получаемых результатов характера распределения толщины стенки раската, определяемого с использованием средств компьютерного моделирования Deform-3D.

На втором шаге проведен анализ изменения угла охвата оправки в очаге деформации 4 и 5 клетей стана FQM. Угол охвата оправки со стороны трех валков, образующих калибр определялся на основании схемы, приведенной на рисунке 44, и рассчитывался по формуле (74). Результаты расчета приведены в таблице 16.

$$\varphi_{факт} = 360 - \frac{180 \cdot k_{\epsilon} \cdot l_{\psi}}{\pi \cdot R_{ср}} . \quad (74)$$



Таблица 16 – Определение угла охвата оправки при исследовании недоката

№ Клетей	Длина зоны отрыва, мм $l_{\psi}$				Средний диаметр раската, мм $D_{cp}$	Фактический угол охвата оправки, град $\varphi_{факт}$
	№ Валка			Сред.		
	1	2	3			
4	158	163	159	160	382	216,01
5	171	174	165	170	382	207,01

Далее осуществляется расчет угла охвата оправки с учетом фактических параметров процесса раскатки для 4 и 5 клетки стана FQM, по разработанным ранее формулам (39), (40) и (48):

$$\varphi_4 = 569,9 \cdot 1,09^{-7,147} \cdot \left[ \left[ 1 - \frac{8,41}{11,33 \cdot [1,287 - 0,244 \cdot 1,32]} \right] \cdot \left[ \frac{1}{49,5 \cdot 1,08} \right]^2 \right]^{0,4115 - 0,3433 \cdot 1,09} = 219,08^\circ,$$

$$\varphi_5 = 569,9 \cdot 1,09^{-7,147} \cdot \left[ \left[ 1 - \frac{7,84}{8,41 \cdot [1,287 - 0,244 \cdot 1,08]} \right] \cdot \left[ \frac{1}{49,5 \cdot 1,03} \right]^2 \right]^{0,4115 - 0,3433 \cdot 1,09} = 210,7^\circ$$

Следует отметить, что разработанная математическая модель позволяет численно определять угол охвата оправки в чистовых калибрах с погрешностью, не превышающей величину 2,0 %.

Таким образом, результаты промышленного исследования процесса раскатки на стане FQM, в частности формирования толщины стенки раската и угла охвата оправки, позволили подтвердить корректность результатов расчета полученных с использованием разработанной Методики определения оптимальной величины овальности чистовых калибров.

Кроме того, результаты решения оптимизационной задачи, приведенные во 2 и 3 главах диссертационной работы показали, что с точки зрения повышения точности труб по толщине стенки оптимальным решением является снижение величины овальности калибра в предшествующей клетке. На следующем этапе необходимо разработать программный продукт адаптированный к технологии

раскатки гильз на стане FQM с целью освоения оптимальной калибровки валков в чистовых клетях при прокатке всего сортаментного ряда производимых труб.

## 4.2 Разработка программного продукта

На первом шаге проектирования были определены основные элементы (разделы) интерфейса программного продукта (рисунок 46).



Рисунок 46 – Основные элементы интерфейса программного продукта

Создание элементов интерфейса программного продукта в соответствии с последовательностью, приведенной на рисунке 46, подразумевает следующее:

1. Наименование раскатного стана. В данном разделе формируется база данных о действующих раскатных станах нового поколения (название и тип стана, место и дата ввода в эксплуатацию и прочее), на основании которых имеется возможность выбрать тип раскатного стана, определить его технические характеристики и номинальные параметры калибровки валков.

2. Система калибров. В данном разделе для выбранного типа стана предлагается перечень действующих систем калибров для проведения последующей оптимизации. В зависимости от выбранной системы калибров в программе подгружаются данные по геометрическим параметрам гильзы и калибровке валков для всех клетей раскатного стана. Настраиваемые параметры

процесса прокатки раскатного стана, в зависимости от выбранного типоразмера труб, регистрируются в отдельной вкладке подпрограммы.

3. Типоразмер производимых труб. Для выбранной системы калибров предлагается задать типоразмер производимой трубы. В зависимости от выбранного типоразмера труб подгружаются настроечные параметры процесса прокатки в раскатном стане.

Следует отметить, что поставщик основного оборудования, в частности компания «Danieli», при проектировании станов типа FQM разрабатывает систему автоматического регулирования процесса раскатки для каждого типоразмера труб и программирует её на "втором" уровне, то есть технолог не имеет возможности внести какие-либо изменения в параметры процесса раскатки. В данной связи оптимизация чистовых калибров позволяет выявлять оптимальные параметры калибровки валков, способствующие повышению точности труб по толщине стенки без изменения параметров процесса раскатки.

4. Овальность чистовых калибров. В данном разделе предусмотрено, что пользователь программы имеет возможность осуществлять варьирование величины овальности калибра для предпоследней и последней клетки раскатного стана. По умолчанию овальность чистовых калибров соответствует номинальной величине для выбранной системы калибров.

5. Система ограничений. В зависимости от выбранных параметров процесса раскатки и величин овальности чистовых калибров осуществляется расчет системы ограничений для заданного типоразмера труб. Система ограничений включает параметры, приведенные в п. 2.1.2.1 и п. 2.1.2.2.

6. Результат оптимизации. В зависимости от варьирования величины овальности чистовых калибров пользователю программы доступны данные по прогнозируемой точности по толщине стенки раскатываемых труб. На основании расчета параметров системы ограничений программа выдает заключение о результате оптимизации и возможности применения данной величины овальности чистовых калибров.

При запуске программы в появившемся диалоговом окне пользователь имеет возможность выбрать либо меню «Оптимизация», то есть перейти непосредственно к расчету оптимальной калибровки валков, либо меню «База данных» с целью получения технической информации по требуемому стану. Диалоговое окно при запуске программы приведено на рисунке 47.

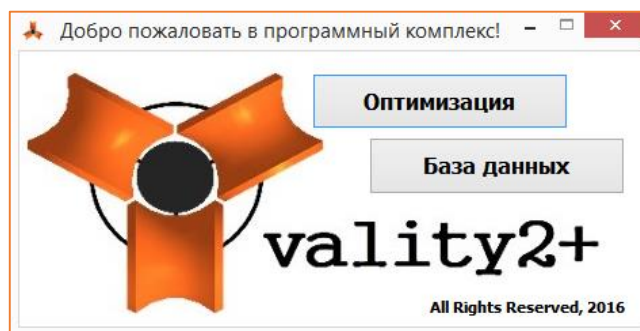


Рисунок 47 – Диалоговое окно при запуске программы Ovality2+

При выборе меню оптимизация запускается подпрограмма для расчета оптимальной величины овальности чистовых калибров, принтскрин диалогового окна представлен на рисунке 48.

В появившемся диалоговом окне пользователь программы выбирает тип стана, требуемую систему калибров и сортамент раскатываемых труб. Также имеется возможность для заданного сортамента раскатываемых труб выбирать требуемую марку стали. Выбор марки стали учтен в программном продукте за счет поправочных коэффициентов, определяющих величину уширения раската, рассчитываемой на основании разработанной ранее формулы (44). Величины поправочных коэффициентов определялись на основании результатов компьютерного моделирования в программном продукте Deform-3D на основе разработанной ранее базовой 3D модели 3-валкового стана.

Оптимизация

Оптимальная овальность чистовых калибров | Номинальные настроечные параметры процесса | Геометрические параметры оптимальной калибровки валков

Стан: FQM Система калибров: 384

Сортамент: 325 x 8,0

Марка стали: 09Г2С

### Условия варьирования величины овальности в чистовых калибрах

	Только в 4 клетки	Только в 5 клетки	Совместное
<b>Овальность калибра</b>	1,06	1,02	1,03
<b>Точность раската, %</b>	8,67	7,45	6,73

#### Ограничения процесса раскатки

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

**Результат оптимизации:** Успешно      Не выполняется      Не выполняется

Рисунок 48 – Подпрограммный модуль «Оптимизация». Вкладка 1

Подпрограммный модуль «Оптимизация» включает в себя 3 рабочие вкладки (рисунок 48):

#### 1. Оптимальная овальность чистовых калибров.

При выборе типа стана, системы калибров, сортамента производимых труб требуемой марки стали осуществляется варьирование величины овальности в чистовых калибрах и расчет параметров системы ограничений с целью определения максимальной точности по толщине стенки производимых труб. Следует отметить, что в одном диалоговом окне пользователь программы имеет возможность осуществлять расчет и отслеживать изменение параметров системы ограничений и точности по толщине стенки производимых труб при условиях варьирования величины овальности как для отдельно 4 и 5 клеток стана, так и при их совместном варьировании. Также в зависимости от условий варьирования

величины овальности чистовых калибров стана в программе предусмотрено ограничение по возможным дефектам поверхности прокатного происхождения.

## 2. Номинальные настроечные параметры процесса.

В зависимости от выбранного сортамента производимых труб в данный вкладке подгружаются номинальные данные по геометрическим параметрам гильзы и настроечным параметрам процесса раскатки в непрерывном стане. Принтскрин рабочего окна представлен на рисунке 49.

Оптимизация						
Оптимальная овальность чистовых калибров		Номинальные настроечные параметры процесса			Геометрические параметры оптимальной калибровки валков	
	O.D. [mm]	I.D. [mm]	W.Th. [mm]	Length [mm]	L. wght [kg/m]	
Finished tube	325.00		8.00			
Shell	433.00	379.20	26.90	7018		
Tube FQM	384.45		8.10	25150	72.33	
Tube extractor	370.00		8.24	25708	70.75	
						Size [mm] 384
						Mandrel diameter [mm] 365.2
						Elongation 3.583
						Outlet speed [mm/s] 2750
						Mandrel recommended speed percentage 85.5
						Steel grade 3
						Additional wall thickness tolerance [%] 1.89
						Extr. wall thickness (FQM btm gorge) [mm] 8.19
Stand #	Inlet	1	2	3	4	5
Size [nom]	mm	396.00	391.20	385.20	384.00	384.00
Eccentricity	mm	6.00	3.00	0.00	0.00	0.00
Roll gap	mm	34.00	32.00	28.00	24.00	24.00
Gorge radius	mm	204.00	198.00	192.00	192.00	192.00
Relief radius	mm	612.00	595.00	577.00	480.00	480.00
Size [act]	mm	393.91	388.94	382.88	381.50	381.50
Cross section	mm2	34319.0	22115.1	15410.9	11668.1	9894.6
Elongation			1.552	1.435	1.321	1.179
Inlet wall thickness	mm		27.77	20.29	13.47	10.74
Outlet wall thickness	mm		15.91	12.16	9.02	8.14
Tube speed	mm/s	767.4	1190.9	1709.0	2257.2	2661.7
Mandrel speed	mm/s	710.0	710.0	710.0	710.0	710.0
Stand spacing	mm	1475.00	1125.00	1350.00	875.00	
Rolling time	sec		1.239	0.658	0.598	0.329
Roll overspeed coefficient			0.965	0.985	1.000	1.012
Roll pitch diameter	mm		692.35	681.41	679.40	437.49
Roll speed	rpm		32.85	47.90	63.45	116.20
Motor speed	rpm		708	833	911	917
Extractor: nominal roll diameters - theoretical roll speeds						
Stand #	1	2	3			
Nom. diam. (mm)	655	655	655			
Th. speed (rpm)	172.4	168.6	166.7			

Рисунок 49 – Подпрограммный модуль «Оптимизация». Вкладка 2

## 3. Геометрические параметры оптимальной калибровки валков.

В данной вкладке пользователю программы предоставляется возможность осуществлять расчет геометрических параметров оптимальной калибровки валков в зависимости от требуемого условия варьирования величины овальности чистовых калибров, приведенного на рисунке 48. Принтскрин рабочего экрана данной вкладки представлен на рисунке 50.

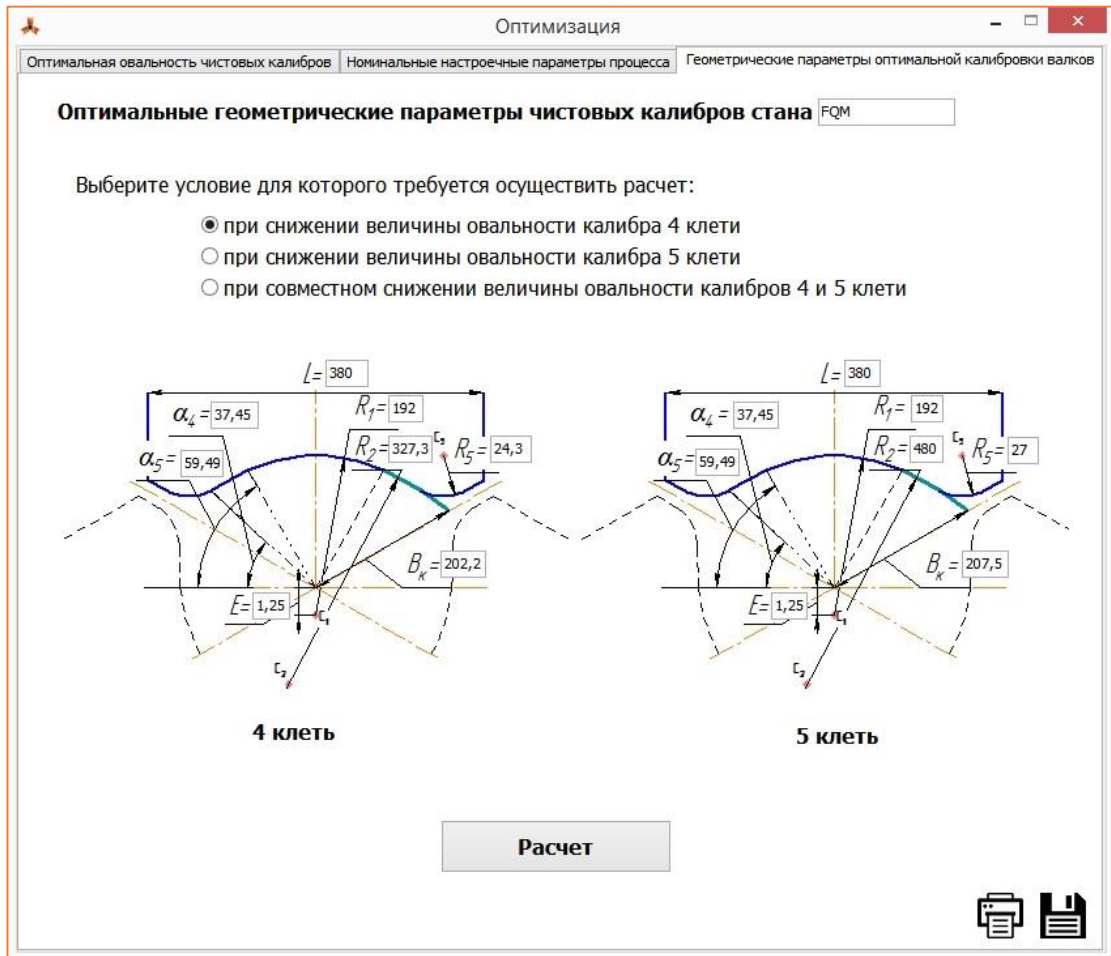


Рисунок 50 – Подпрограммный модуль «Оптимизация». Вкладка 3

Таким образом, на основании расчетов проведенных в подпрограммном модуле «оптимизация», пользователю программы будут доступны оптимальные геометрические параметры чистовых калибров, при использовании которых для выбранного типа стана и требуемого сортаментного ряда труб будет обеспечена максимальная точность раската по толщине стенки за непрерывным раскатным станом при прочих равных условиях, а рекомендации на основе расчета параметров системы ограничений позволят снизить риски возникновения аварийных ситуаций, вызванные в частности максимальным углом охвата оправки, способствующем торможению раската в межклетевом промежутке. Кроме того, максимальный угол охвата с учетом отрицательного воздействия оправки на раскат негативно сказывается, во-первых, на условия первичного и вторичного захвата металла валками, что чревато возникновением дефекта вида "гармошка" в

межклетевом промежутке чистовых калибров, а во-вторых способствует формированию дефектов прокатного происхождения в виде поперечных разрывов и подрезов, образующихся в выпусках калибра.

При переходе в подпрограммный модуль «База данных» пользователь может ознакомиться с действующими непрерывными раскатанными станами с 3-валковыми калибрами, расположенными как на территории РФ, так и других стран мира. Диалоговое окно подпрограммного модуля «База данных», приведено на рисунке 51. При выборе страны и соответственно предприятия, программа автоматически определяет его месторасположение, для этого в программном модуле предусмотрена синхронизация с яндекс картами (yandex maps). На рисунке 51 в качестве примера представлено определение компании Baotou Steel Group, расположенного в КНР (Китай).

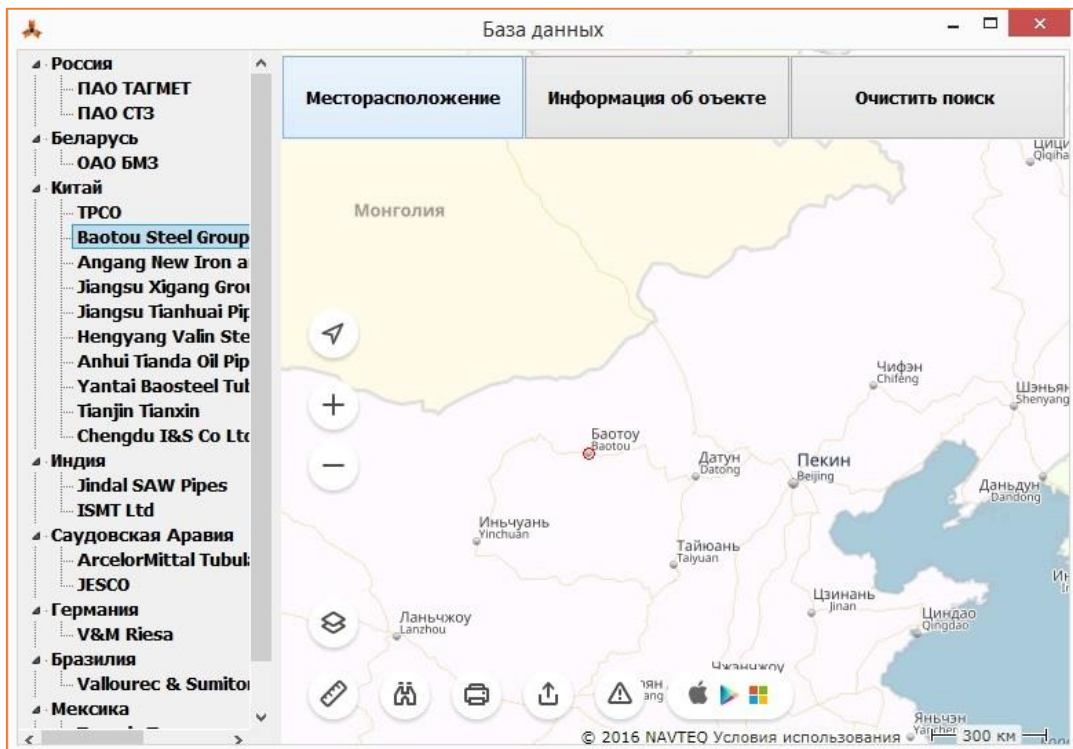


Рисунок 51 – Подпрограммный модуль «База данных»  
вкладка "Месторасположение"

Вкладка "Информация об объекте" предоставляет пользователю возможность ознакомиться с техническими характеристиками выбранного



раскатного стана, в качестве примера на рисунке 52 представлены технические характеристики стана, расположенного на предприятии ПАО «СТЗ».

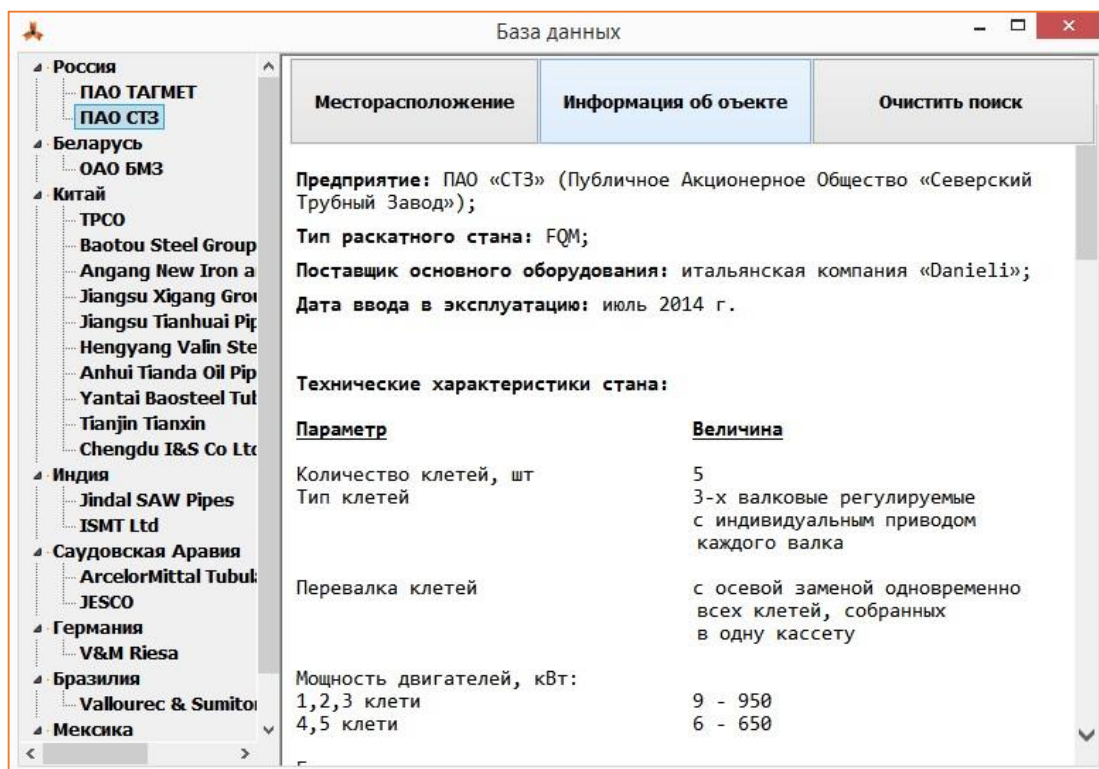


Рисунок 52 – Подпрограммный модуль «База данных»  
вкладка "Информация об объекте"

Реализация программного продукта была осуществлена с использованием языка программирования Delphi интегрированного в платформе Embarcadero RAD Studio XE7. Разработанный программный продукт Ovality2+ [152] зарегистрирован Федеральной службой по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) и подтверждается Свидетельством о государственной регистрации № 2016662544 от 15.11.2016 г.

На следующем этапе работы рассмотрены вопросы разработки технических решений, способствующих повышению точности труб по толщине стенки, базирующихся на полученных выше результатах.

### 4.3 Разработка технических решений, направленных на повышение точности горячекатаных бесшовных труб

#### 4.3.1 Система калибров непрерывного трубопрокатного стана

При анализе характера распределения толщины стенки в поперечном сечении раската, приведенного в п. 3.5, выявлено, что при равной величине овальности чистовых калибров толщина стенки в зоне отрыва раската от оправки получает некоторое утонение от номинальной толщины, при этом, по линии разъема валков стенка утолщается. Анализируя полученные результаты с точки зрения соотношения площадей металла в обжимной зоне и зоне выпуска калибра следует, что большее количества металла по периметру калибра последней клетки стана формируется в зоне выпуска. Результаты представлены на рисунке 53.

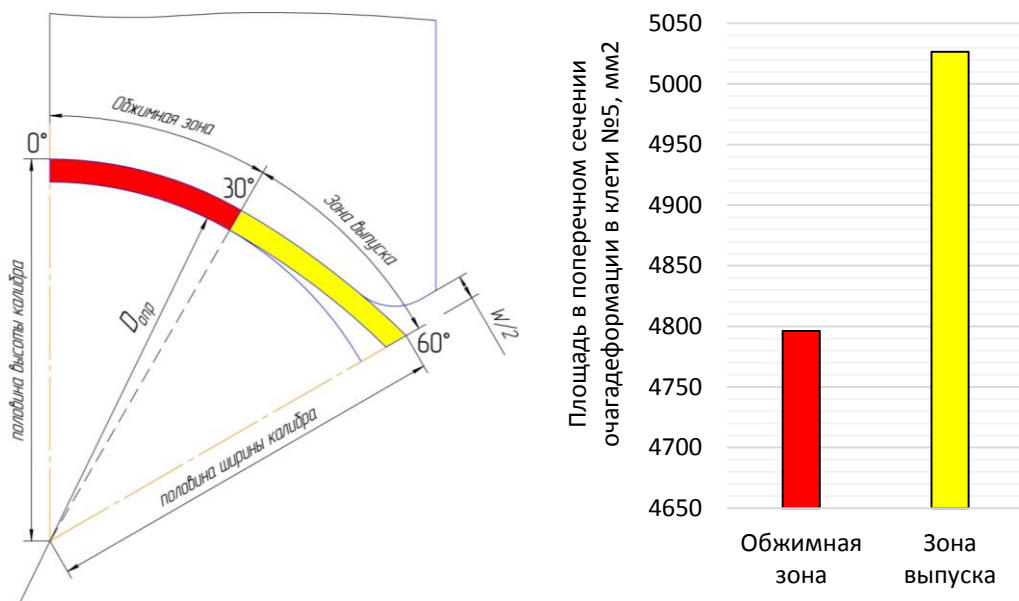


Рисунок 53 – Соотношение площадей обжимной зоны и зоны выпуска в поперечном сечении раската на выходе из последней клетки

Отношение площадей зоны выпуска и обжимной зоны калибра определялось в соответствии с формулой:

$$F_{B/O} = \frac{F_{ЗВ}}{F_{ОЗ}}, \quad (75)$$

где  $F_{ЗВ}$  – площадь зоны выпуска;

$F_{ОЗ}$  – площадь обжимной зоны.

В идеале соотношение площадей (75) должно быть равно 1,0, то есть раскат имеет абсолютно круглую форму, однако реализовать такой процесс в виду ограничений, приведенных в п. 2.1.2.1 и п. 2.1.2.2 крайне затруднительно. На рисунке 54 представлено изменение параметра  $F_{B/O}$  в последней клетке раскатного стана в зависимости от величины овальности калибра. В данном случае точность достигается последней клетью [147, 148].

Однако, результаты исследования, приведенные в п. 3.5 показали, что снижение овальности в предпоследнем калибре способствует лучшей проработке толщины стенки в выпуске калибра, при этом деформация в последнем калибре направлена на обеспечение требуемого угла охвата оправки не препятствующего извлечению раската.

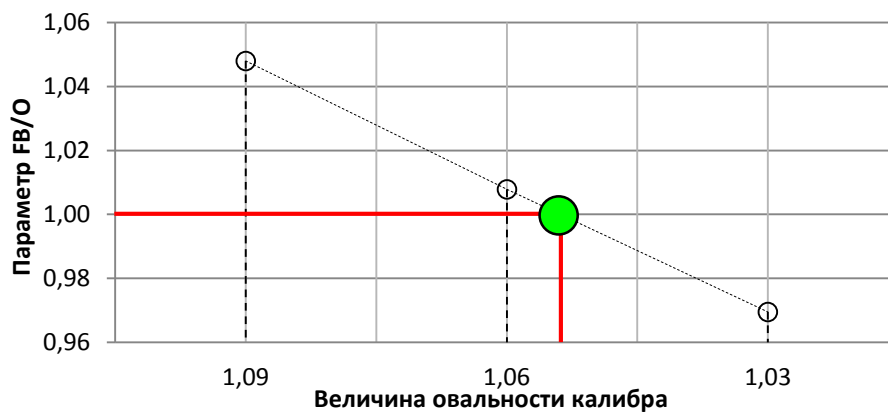


Рисунок 54 – Изменение параметра  $F_{B/O}$ , в последней клетке раскатного стана

Для оценки характера распределения толщины стенки раската в выпуске калибра и изменения угла охвата оправки в последней клетке раскатного стана проанализированы варианты раскатки труб, при которых деформация раската в чистовых калибрах осуществлялась при: равной величине овальности (1,09); при величине овальности калибра в предпоследней клетке равной 1,06 и последней 1,09 и наоборот в калибре предпоследней клетки 1,09 и последней 1,06. Результаты представлены на рисунках 55, 56. Следует отметить, что распределение толщины стенки в выпуске калибра, приведенного на рисунке 55, соответствует участку

поперечного сечения раската от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  определяемого в соответствии с рисунком 53.

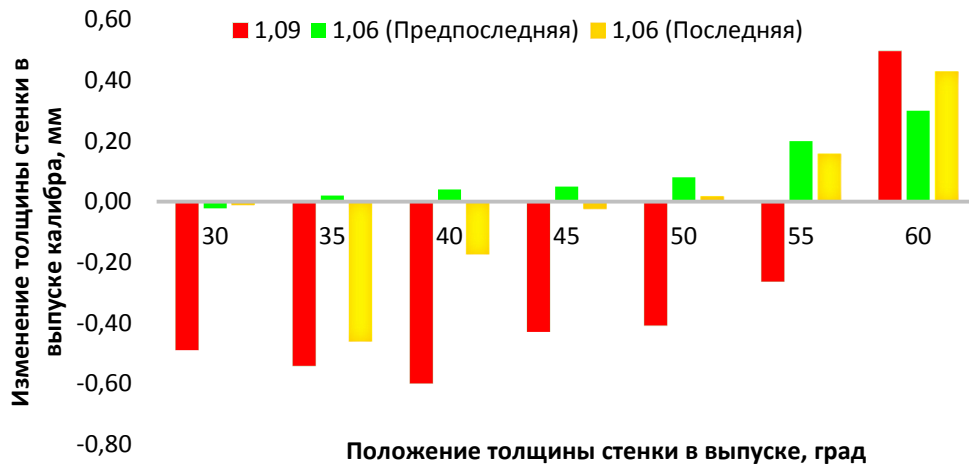


Рисунок 55 – Изменение толщины стенки в выпуске в зависимости от величины овальности калибра

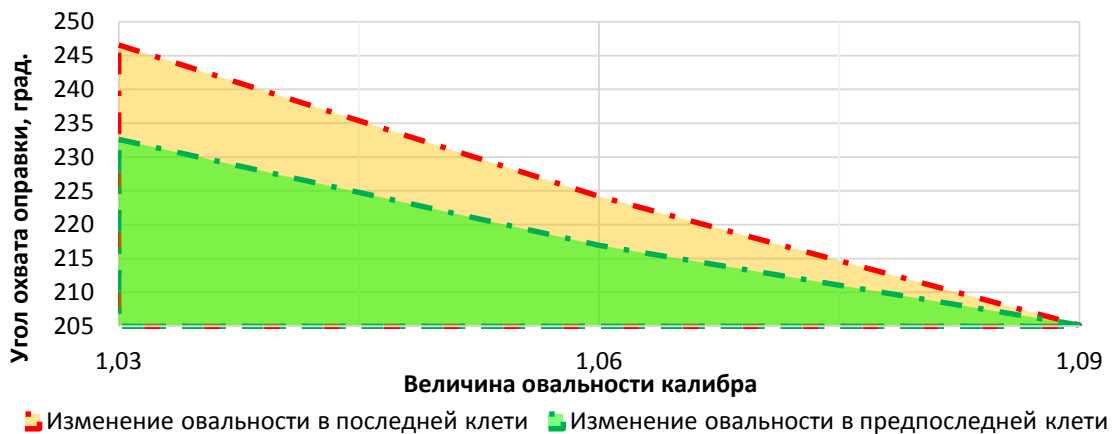


Рисунок 56 – Изменение угла охвата оправки в зависимости от величины овальности калибра

Руководствуясь результатами, приведенными в п. 3.5 и на рисунках 55, 56 следует, что уменьшение величины овальности калибра в направлении к последующему калибру способствует утонению толщины стенки, однако уменьшение овальности в последнем чистовом калибре будет способствовать увеличению угла охвата оправки. А при выполнении чистовых калибров таким образом, чтобы в предпоследнем калибре величина овальности была меньше, чем в последнем, в выпусках калибра будет происходить утонение толщины стенки

раската и более равномерное распределение толщины стенки в поперечном сечении раската. При последующем деформировании раската в последнем чистовом калибре с большей величиной овальности, чем в предпоследнем калибре, толщина стенки в выпусках калибра соизмерима с толщиной стенки, полученной в вершине предпоследнего чистового калибра, при этом величина охвата оправки обеспечивает беспрепятственное извлечение раската, причем лучшие результаты получены при выполнении предпоследнего чистового калибра с меньшей величиной овальности, чем последнего не более чем на 4 % (п. 2.3).

Экспериментальные исследования показали, что уменьшение величины овальности предпоследнего чистового калибра относительно последнего более чем на 4 % приводит к появлению дефектов по телу раската в виде поперечных разрывов, образующихся в выпусках калибра, способствует увеличению разнотолщинности стенки в поперечном сечении раската за счет большего истечения металла в выпуски предпоследнего калибра, полному охвату оправки металлом.

На экспериментальной установке для осуществления процесса продольной прокатки труб, а также с использованием средств компьютерного моделирования было проведено исследование формоизменения раската при прокатке труб в предлагаемой системе калибров, в которой периметр поперечного сечения и овальность черновых калибров уменьшаются в направлении к последующему калибру, и предпоследний чистовой калибр выполнен с меньшей величиной овальности, чем последний чистовой калибр. При прокатке на экспериментальной установке использовали универсальные трехвалковые клетки «170» с расположением валков относительно друг друга под углом  $120^\circ$ . Для такой системы калибров величина овальности составила 1,12; 1,11; 1,10; 1,09 и 1,09; соответственно для каждой клетки. Для предлагаемой системы калибров предпоследний чистовой калибр выполнен с величиной овальности 1,06, что меньше величины овальности последнего чистового калибра на 2,75 %.

Анализ результатов экспериментального исследования показал, что при проведении прокатки с использованием предлагаемой системы калибров, с

меньшей величиной овальности в предпоследнем чистовом калибре, величина относительной поперечной разнотолщинности раската снизилась в 1,5 раза, при этом угол охват оправки увеличился незначительно – в 1,073 раза, было обеспечено беспрепятственное извлечение раската из последней клетки стана.

При прокатке в системе калибров, где предпоследний чистовой калибр выполнен с величиной овальности 1,03, что меньше величины овальности последнего чистового калибра на 5,5 %, по телу раската наблюдались дефекты в виде поперечных разрывов в выпусках калибра и значительный угол охвата оправки (п.2.1.2.2).

Применение предлагаемой системы калибров на непрерывных раскатных станах позволит повысить точность готовых труб по толщине стенки при допустимой величине охвата оправки металлом на выходе из последней клетки стана, обеспечивая безаварийные условия в процессе извлечения раската в стане-извлекателе и/или в извлекательно-калибровочном стане.

Таким образом, на основании проведенного исследования, необходимо отметить следующее:

1. Система калибров непрерывного трубопрокатного стана, включающая последовательно расположенные черновые калибры, периметр поперечного сечения и овальность которых уменьшаются в направлении к последующему калибру, и установленные за ними чистовые калибры, отличающаяся тем, что предпоследний чистовой калибр выполнен с меньшей величиной овальности, чем последний чистовой калибр.

2. Система калибров по п. 1 отличающаяся тем, что величина овальности предпоследнего чистового калибра меньше величины овальности последнего не более чем на 4 %.

Заявка к патентованию «Система калибров непрерывного трубопрокатного стана» направлена в Евразийское патентное ведомство (ЕАПВ) и зарегистрирована под № 201600602 от 29.08.2016 г.

### 4.3.2 Калибр трубопрокатного стана

Повышение точности раскатываемых труб за счет снижения величины овальности калибра способствует повышению угла охвата оправки, что в свою очередь снижает ресурс её использования. При разработке нового технического решения ключевым моментом является снижение угла охвата оправки в предпоследнем чистовом калибре при сохранении точности труб по толщине стенки, обеспечиваемой оптимальной калибровкой валков. Таким образом, задача заключается в повышении качества готовых труб за счёт обеспечения равномерной толщины стенки в поперечном сечении раската и уменьшении угла охвата оправки металлом раската.

Поставленная задача решается за счет того, что в 3-валковом калибре трубопрокатного стана, образованном ручьями валков, профиль поперечного сечения каждого валка образован расположенными симметрично относительно оси калибра центральной дугой, сопряженными с ней радиусными выпусками, каждый из которых образован сопряженными между собой двумя дугами, а также дугами периферийных участков профиля поперечного сечения валка, каждая дуга которых сопряжена с дугой соответствующего радиусного выпуска (рисунок 57).

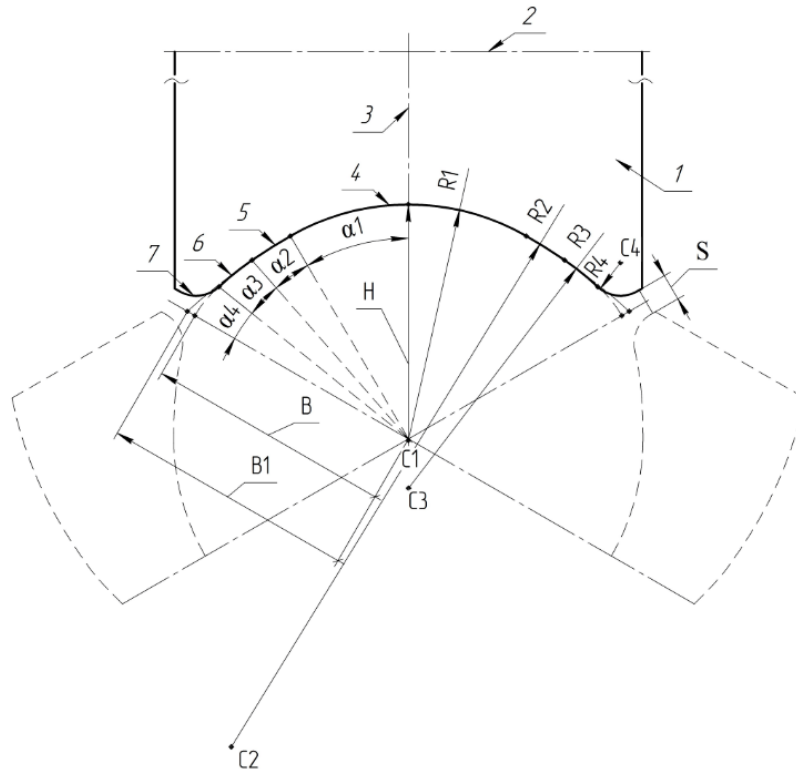


Рисунок 57 – Калибр трубопрокатного стана

На рисунке изображён один из трёх валков, образующих калибр, ось валка 2, ось калибра 3, центральная дуга 4, дуги 5 и 6 радиусного выпуска, дуга 7 периферийного участка, сопряженные между собой и образующие контур калибра. Расстояние (В1) от центра калибра до точки пересечения продолжения дуги 5 радиусного выпуска, сопряженной с центральной дугой 4, выполненной радиусом R1, проведенным из центра расположенного на оси симметрии калибра равным или больше высоты калибра не более чем на 0,3 мм, с линией разъема калибра составляет  $1,08 \div 1,09$  от высоты калибра. Ширина калибра (В) составляет  $1,04 \div 1,07$  от высоты калибра и соответствует расстоянию от центра калибра до точки пересечения продолжения дуги 6 радиусного выпуска, сопряженной с дугой 7 периферийного участка, с линией разъема калибра. Угол  $\alpha_1$  соответствует половине центральной дуги 4, угол  $\alpha_2$  составляет  $9 \div 11^\circ$  и соответствует дуге 5 радиусного выпуска, сопряженной с центральной дугой 4. Угол  $\alpha_3$  составляет  $10 \div 11^\circ$  и соответствует дуге 6 радиусного выпуска, сопряженной с дугой 5. Угол  $\alpha_4$  между линией разъема калибра и линией от центра калибра до точки сопряжения дуги 7 периферийного участка с дугой 6 радиусного выпуска составляет  $7 \div 8^\circ$ . Выбранные диапазоны углов, соответствующие дугам 5, 6 и 7, образующим контур калибра, а также диапазоны ширины калибра и расстояния от центра калибра до точки пересечения продолжения дуги 5 с линией разъема калибра обеспечивают равномерную толщину стенки по периметру поперечного сечения раската за счет перераспределения течения металла в зонах выпуска калибра и снижение охвата оправки металлом раската.

Раскат, подвергшийся деформации в клети по дну ручья калибра, попадает в выпуск следующего калибра, выполненного в соответствии с предлагаемым решением, и снова деформируется по дну ручья, при этом значения углов, соответствующих дугам контура этого калибра, выбраны из диапазона заявленных значений таким образом, чтобы обеспечить уменьшение разнотолщинности и угла охвата оправки в поперечном сечении раската.

Экспериментальные исследования показали, что при значениях углов, соответствующих дугам 5, 6 и 7, больших, чем заявленные, наблюдалась



неравномерная толщина стенки по периметру поперечного сечения раската, а при значениях углов этих же дуг меньших, чем заявленные, увеличивался охват оправки раскатом, что приводило к снижению качества труб и повышенному износу прокатного инструмента. При увеличении верхних значений диапазонов ширины калибра ( $B$ ) и расстояния ( $B1$ ) от центра калибра до точки пересечения продолжения дуги 5 с линией разъема калибра по сравнению с заявленными значениями наблюдалась неравномерная толщина стенки по выпуску калибра, в частности толщина стенки по линии разъема калибра была меньше, чем в вершине этого калибра, что приводило к повышенной разнотолщинности раската. А при значениях этих величин ( $B1$  и  $B$ ) меньших, чем нижние заявленные пределы, происходил полный оков оправки, что приводило к возникновению аварийных ситуаций на стане и повышенному износу валков и оправок.

На экспериментальной установке для осуществления процесса продольной прокатки труб (п. 3) и с использованием средств компьютерного моделирования было проведено исследование формоизменения и анализ напряженно-состояния при прокатке труб в круглых калибрах и с использованием предлагаемого калибра трубопрокатного стана. При прокатке использовали, в частности универсальные трехвалковые клетки «170» с расположением валков относительно друг друга под углом  $120^\circ$ . Исследование предлагаемого калибра проводили, в частности на позиции четвертой клетки пятиклетевого стана. Для первого, второго и третьего проходов использовали классическую калибровку валков, выполненную с овальной обжимной зоной и выпуском по радиусу.

Для предлагаемой калибровки валков угол  $\alpha_4$  между линией разъема калибра и линией от центра калибра до точки сопряжения дуги 7 периферийного участка с дугой 6 радиусного выпуска выбран равным  $7^\circ$ , угол  $\alpha_2$ , соответствующий дуге 5 радиусного выпуска, сопряженной с центральной дугой 4, выбран равным  $11^\circ$ , угол  $\alpha_3$ , соответствующий дуге 6 радиусного выпуска, сопряженной с предыдущей дугой 5 радиусного выпуска, выбран равным  $10^\circ$ . При этом угол  $\alpha_1$ , соответствующий половине центральной дуги 4, составил  $32^\circ$ . Расстояние  $B1$  от центра калибра до точки пересечения продолжения дуги 5 радиусного выпуска,

сопряженной с центральной дугой 4, с линией разъема калибра составило 19,7 мм, что соответствует 1,08 от высоты калибра. Расстояние В от центра калибра до точки пересечения продолжения дуги 6 радиусного выпуска, сопряженной с дугой 7 периферийного участка, с линией разъема калибра составило 19,1 мм, что соответствует 1,05 от высоты калибра.

В ходе эксперимента определяли характер распределения толщины стенки раската в очаге деформации при использовании двух систем калибров и охват оправки металлом после последнего прохода. Для прокатки использовали свинцовые патрубки из литой заготовки диаметром 41 мм с толщиной стенки 2,5 мм, которые механически обрабатывали под необходимый размер. В прокат было задано 28 патрубков, прокатку которых осуществляли на оправке диаметром 35 мм. Исследовали процесс прокатки с последовательной деформацией металла по клетям стана с использованием средств компьютерного моделирования. Поперечное сечение раската в очаге деформации после последнего прохода рассчитывали по методу получения растрового изображения высокой чёткости с последующей обработкой на компьютере.

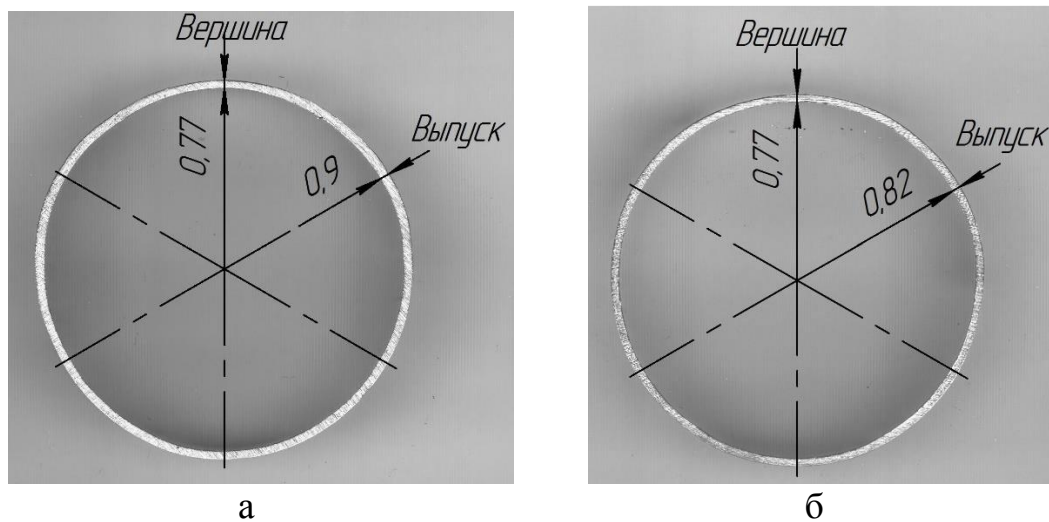


Рисунок 58 – Поперечное сечение раската при деформации в чистовых калибрах:

а – с равной величиной овальности; б – с использованием нового калибра

Из анализа результатов, приведенного на рисунке 58, следует, что использование нового калибра в предпоследнем чистовом проходе способствует лучшему распределению толщины стенки в поперечном сечении раската, в

сравнении с прокаткой в калибрах с равной величиной овальности. Следует отметить, что прокатка по первому варианту (рисунок 58а) осуществлена в калибрах с величиной овальности 1,09. По второму варианту в первом чистовом проходе применен новый калибр, образованный двумя радиусными выпусками, причем ширина калибра обеспечивала овальность равную 1,06, а во втором проходе применен калибр с величиной овальности 1,09, что не противоречит принципам построения системы калибров с оптимальной калибровкой валков в чистовых клетях. По результатам исследования величина поперечной разнотолщинности раската при использовании нового калибра снизилась примерно в 1,7 раза, за счет лучшей проработки толщины стенки в выпуске, при этом угол охвата после первого и второго проходов уменьшился в 1,2 и 1,06 раза соответственно.

Разработанное техническое решение было применено для СК 384 мм стана FQM при раскатке труб наружным диаметром 379,2 мм с толщиной стенки 7,8 мм. На основании результатов мониторинга технологии изготовления труб, компьютерного и физического моделирования установлено, что разработанный калибр на позиции четвертой клетки стана FQM позволяет повысить точность по толщине стенки на готовых трубах не менее чем в 1,5 раза. Характер распределения толщины стенки после 4 и 5 прохода представлен на рисунке 59.

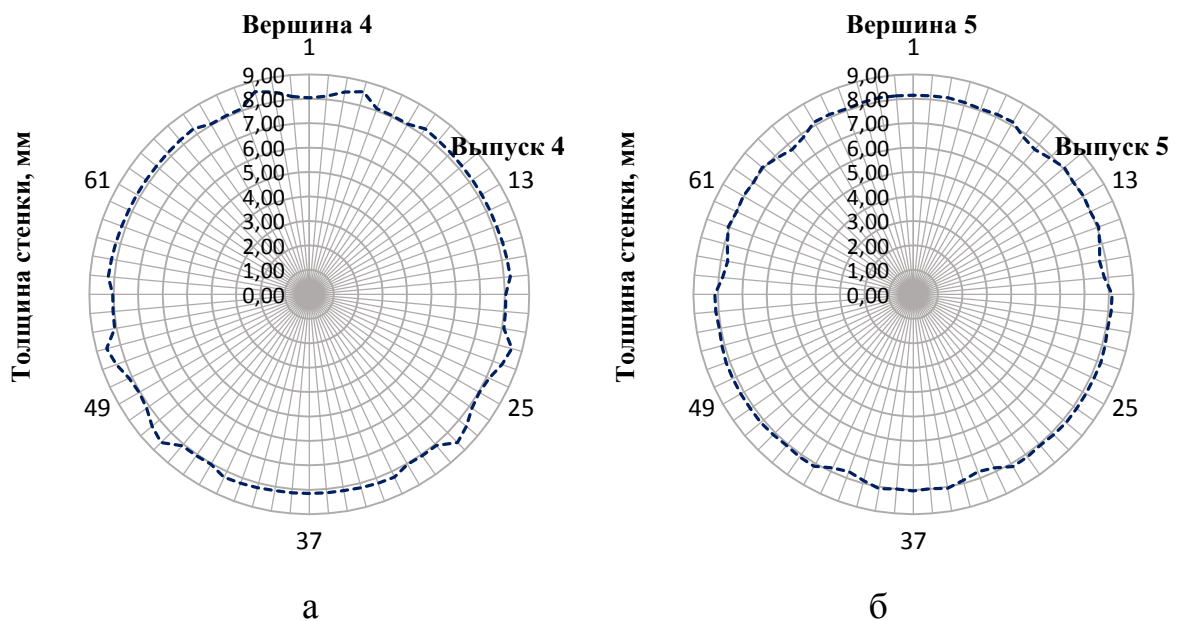


Рисунок 59 – Характер распределения толщины стенки раската после:  
а – четвертого прохода; б – пятого прохода

Результаты исследования технологии прокатки с использованием чистовых калибров с равной величины овальности, оптимальной и нового калибра в 4 клетки представлены на рисунках 60, 61.

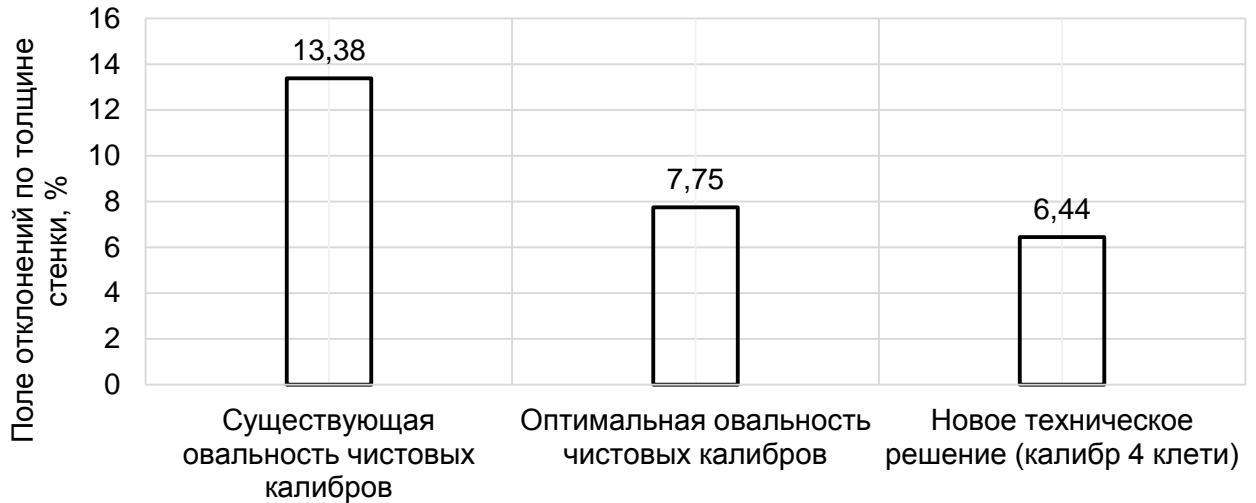


Рисунок 60 – Поле отклонений по толщине стенки

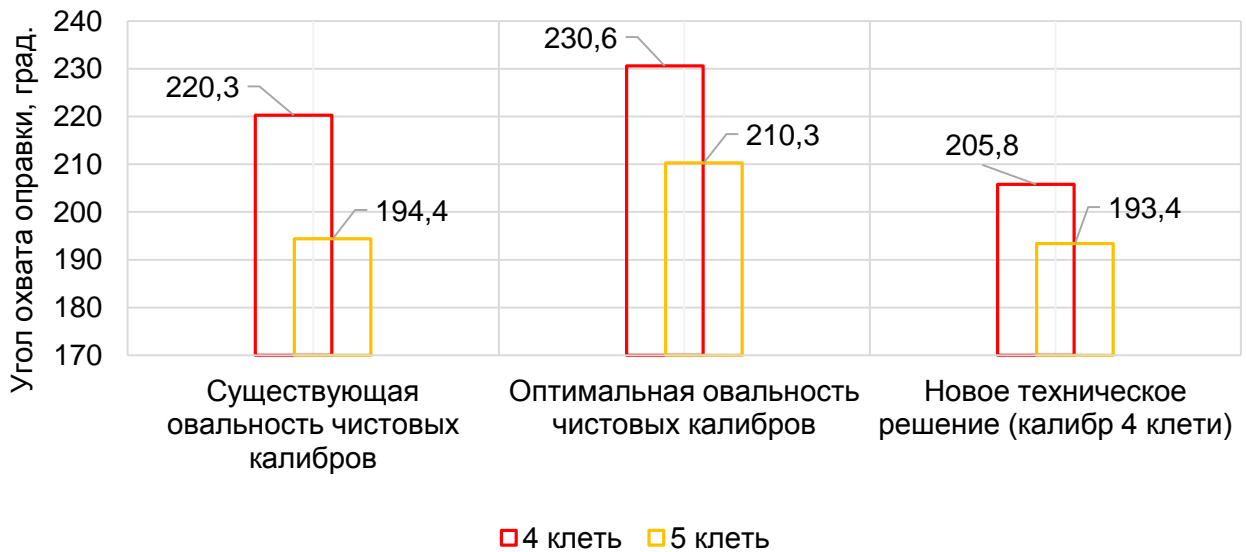


Рисунок 61 – Угол охвата оправки

Для проведения сравнительного анализа характера изменения напряженного состояния раската, полученного с использованием систем калибров с равной величиной овальности чистовых калибров и с новым калибром в 4 клетки проведено компьютерное моделирование. Анализ напряженного состояния раската проведен

на основе исследования изменения относительного коэффициента  $k$  [15, 90, 149-151], определяемого в соответствии с формулой:

$$k = \frac{\sigma}{T} \quad (76)$$

где  $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$  – величина среднего гидростатического давления в точке, МПа;

$T = +\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2}$  – интенсивность касательных напряжений, МПа;

С целью отслеживания изменения коэффициента  $k$ , в процессе деформации раската в чистовых калибрах, на исходную полу заготовку были нанесены контрольные точки P1 и P2 (рисунок 62а) соответствующие выпуску и вершине последнего чистового калибра (рисунок 62б).

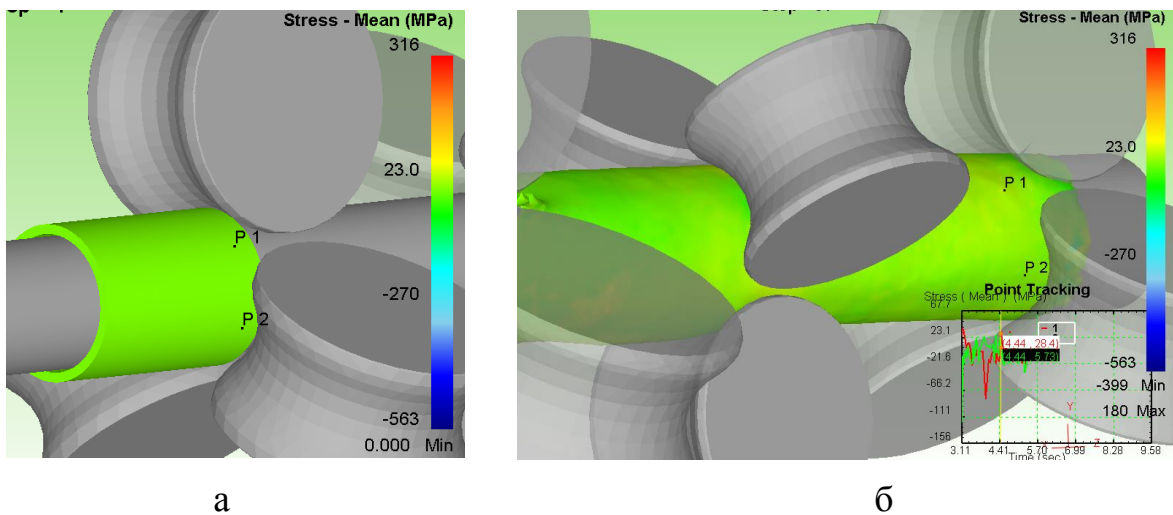


Рисунок 62 – Расположение контрольных точек P1 и P2:

а – на исходной заготовки; б – при раскатке в чистовых калибрах

Величина среднего гидростатического давления и интенсивность касательных напряжений для рассматриваемых точек определялись с использованием программного продукта Deform-3D. Для проведения сравнительно

анализа напряженного состояния раската было осуществлено моделирование для существующей конечно-элементной модели с параметрами калибровки валков, соответствующей точке начального приближения. Далее в данной модели было применено новое техническое решение в 4 клетки.

Изменение коэффициента  $k$  в предпоследнем и последнем калибре в зависимости от времени прокатки при равной и оптимальной величине овальности чистовых калибров представлено на рисунке 63.

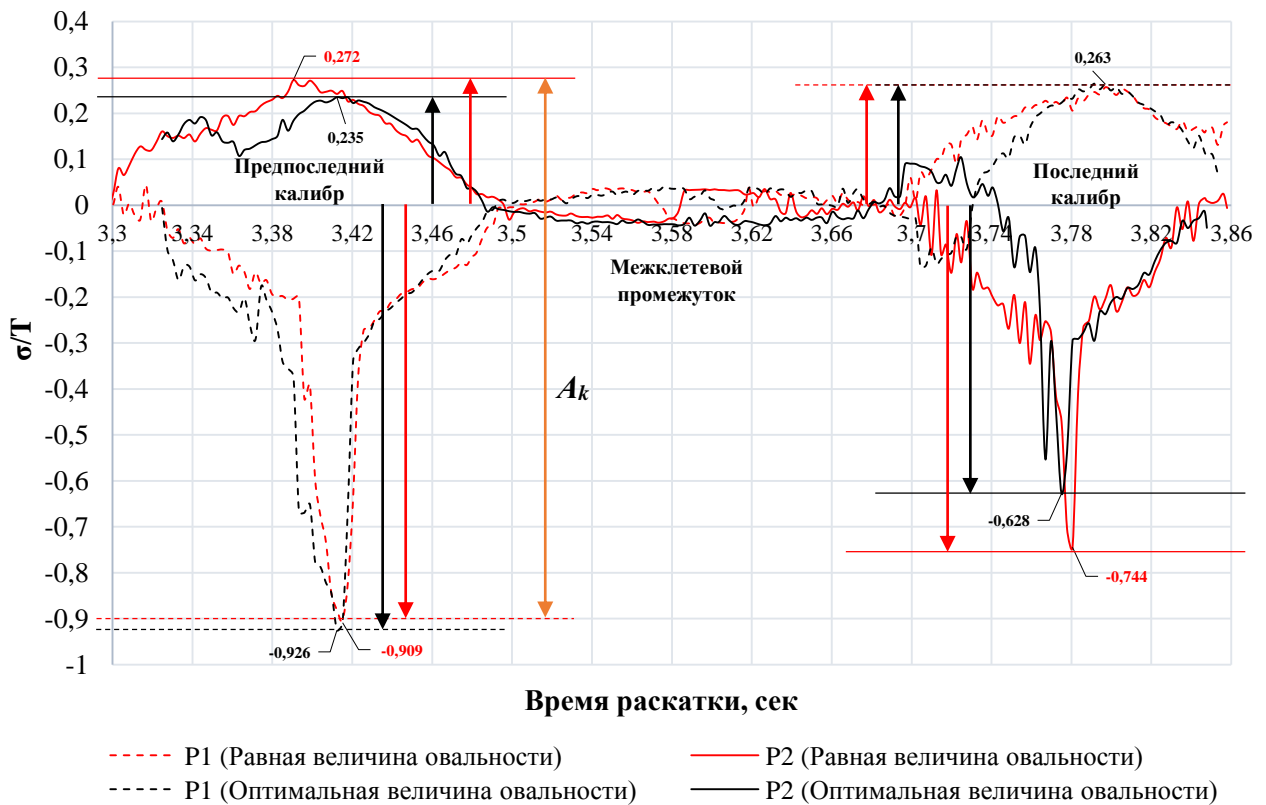


Рисунок 63 – Изменение коэффициента  $k$  в зависимости от времени прокатки при равной и оптимальной величине овальности чистовых калибров

На основании полученных результатов, следует, что использование нового калибра позволяет уменьшить коэффициент напряженного состояния  $\sigma/\Gamma$  в выпуске предпоследнего чистового калибра на 13,6 %, при этом в вершине этого же калибра зафиксировано увеличение коэффициента  $k$  на 1,8 %, что свидетельствует о росте сжимающих напряжений. Напряженное состояние в выпуске последнего чистового калибра при использовании как с равной величиной

овальности, так и с использованием нового калибра остается одинаковым. При этом в вершине последнего чистового калибра наблюдается снижение коэффициента  $k$  на 15,6 %. Снижение сжимающих напряжений в вершине последнего чистового калибра обусловлено лучшим распределением и проработкой толщины стенки в выпуске предпоследнего калибра, то есть распределение толщины стенки в зоне выпуска предпоследнего калибра соответствует обжимной зоне последнего калибра. А с учетом того, что обжимные зоны предпоследнего и последнего калибра имеют одинаковую угловую протяженность, соответственно в вершине последнего калибра происходит проглаживание стенки раската без дополнительного её утолщения в выпусках калибра, а за счет большей величины овальности последнего калибра, обеспечивается и требуемый угол охвата оправки, позволяющий осуществить беспрепятственный съем раската с оправки.

Амплитуда разброса  $A_k$  – абсолютная разница изменения коэффициента  $k$ , рассчитанная по максимальным значениям, при использовании нового калибра, при раскатке в предпоследнем чистовом калибре снизилась на 1,7 %, а в последнем калибре на 10,5 %.

Таким образом, применение предлагаемого калибра трубопрокатного стана позволяет повысить точность раскатываемых труб, способствует уменьшению рисков возникновения аварийных ситуаций при извлечении раската и способствует увеличению ресурса использования оправок раскатного стана (Приложении А).

Заявка к патентованию «Калибр трехвалкового трубопрокатного стана» направлена в Евразийское патентное ведомство (ЕАПВ) и зарегистрирована под №201600605 от 29.08.2016 г.

#### **4.4 Выводы по главе**

1. Сопоставление результатов, полученных с использованием разработанной методики расчета оптимальной величины овальности калибров чистовых клетей с промышленными данными показывает высокую степень сходимости. Из анализа результатов следует, что погрешность расчета не превышает 8,6 %. Кроме того,

разработанная формула определения угла охвата оправки позволяет определить данную величину с погрешностью не более 2,0%.

2. Программный модуль «Оптимизация», адаптированный к технологии раскатки труб в линии ТПА со станом FQM, позволяет оперативно определять оптимальное соотношение форм чистовых калибров, обеспечивающих раскатку труб с повышенной точностью. Программный модуль «База данных» позволяет идентифицировать характеристики требуемого раскатного стана.

3. Освоение нового калибра в 4 клетки стана FQM подтвердило целесообразность его использования с точки зрения повышения точности труб по толщине стенки (не менее чем в 1,5 раза), повышения ресурса использования оправок раскатного стана и снижения рисков возникновения аварийных ситуаций при извлечении раската (Приложение А).



## 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 снижение овальности калибра в предпоследней клетке.

2. Разработанные формулы для расчета угла охвата оправки, уширения раската и изменения толщины стенки в выпуске калибра, позволили численно 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 клеток 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 клеток, с промышленными данными показало высокую степень сходимости, как с точки зрения определения разнотолщинности стенки раската

(погрешность не более 8,6 %), так и с точки зрения 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.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Ширяев, А.Г. Настало время продукта, комплексного предложения и индивидуального обслуживания / А.Г. Ширяев // *Металлоснабжение и сбыт.* – 2016. – № 4. – С. 13 – 17.
2. Пышминцев, И.Ю. К новым рубежам / И.Ю. Пышминцев // *Сталь.* – 2016. – № 1. – С. 2 – 7.
3. Чикалов, С.Г. Концептуальное проектирование / С.Г. Чикалов // *Металлоснабжение и сбыт.* – 2016. – № 1. – С. 24 – 27.
4. Выдрин, А.В. Развитие технологий горячей прокатки бесшовных труб / А.В. Выдрин // *Черные металлы* – 2012 г. – №9. – С. 16 – 20.
5. Друян, В.М. Теория и технология трубного производства / В.М. Друян, Ю.Г. Гуляев, С.А. Чукмасов – Днепропетровск, РИА «Днепр-ВАЛ», 2001. – 544 с.
6. Пат. 1077013 US. Process and apparatus for cross rolling and expending tubes / R.C. Stiefel. – 1912 г.
7. Пат. 24956 SA. Machine for manufacturing seamless tubes / Ch. Kellogg. – 1886 г.
8. Пат. 9579. Improvements in Rolling Mills / A. Fassl. – 1905 г.
9. Потапов, И.Н. Теория трубного производства / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.М. Друян – М.: *Металлургия*, 1991. – 424 с.
10. Выдрин, А.В. Новые решения для моделирования процессов горячей и холодной прокатки труб / А.В. Выдрин. Трубы. Украина 2007, Международная конференция «Современные направления производства сварных и бесшовных труб из черных и цветных металлов». С. 43 – 55.
11. Пышминцев, И.Ю. Создание комплекса оборудования для исследования и моделирования процессов деформации труб / И.Ю. Пышминцев, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко, А.Т. Кутепов, Д.В. Луценко, В.И. Чурбанов XVII международная конференция «Трубы – 2009» – Челябинск, 2009. – С. 147–150.
12. Выдрин, А.В. Моделирование технологических процессов в трубопрокатном производстве как способ повышения их эффективности / А.В.

Выдрин, П.А. Мальцев, В.В. Широков, Д.В. Луценко, М.Д. Алютин, А.О. Малкова // Бюллетень «Черная металлургия». – М.: «Черметинформация», 2011. – №4. – С.69 – 72.

13. Дукмасов, В.Г. Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества / В.Г. Дукмасов, А.В. Выдрин – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 215 с.

14. Колмогоров, В.Л. Решение технологических задач ОМД на микро-ЭВМ / В.Л. Колмогоров, С.И. Паршаков, С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов и др. – М.: Металлургия, 1993. – 320 с.

15. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

16. Данченко, В.Н. Продольная прокатка труб / В.Н. Данченко, А.В. Чус – М.: Металлургия, 1984, 136 с.

17. Данилов, Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб / Ф.А. Данилов, А.З. Балакин, В.Г. Глейберг. – 3-е. изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1972. – 576 с.

18. Чикалов, С.Г. Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки / С.Г. Чикалов – Волгоград: Комитет по печати и информации, 1999, 416 с.

19. Романцев, Б.А. Трубное производство / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2011, 970 с.

20. Осадчий, В.Я. Производство и качество стальных труб / В.Я. Осадчий, А.П. Коликов – М.: Издательство МГУПИ, 2012. – 370 с.

21. Зимовец, В. Г. Совершенствование производства стальных труб / В. Г. Зимовец – М.: МИСиС, 1996. – 480 с.

22. Романцев, Б.А. Обработка металлов давлением / Б. А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2008. – 960 с.

23. Гуляев, Г.И. Совершенствование производства горячекатаных труб / Г.И. Гуляев, А.С. Коба, Ю.М. Миронов и др. – Киев: Техника, 1985. – 136 с.

24. Матвеев, Б.Н. Горячая прокатка труб / Б.Н. Матвеев. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 142 с.
25. Осадчий, В.Я. Технология и оборудование трубного производства / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец, А. П. Коликов; под ред. В. Я. Осадчего. – М.: Интернет Инжиниринг, 2007. – 560 с.: ил.
26. Коликов А.П. Машины и агрегаты трубного производства / А. П. Коликов, В. П. Романенко, С. В. Самусев и др.; под ред. А. П. Коликов. – М.: МИСИС, 1998. – 536 с.
27. Осадчий, В.Я. Технология и оборудование трубного производства: учебник для вузов / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец и др. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
28. Пляцковский О.А. Производство труб на агрегатах с пилигримовым станом / О.А. Пляцковский, В.И. Девятисильный, В.П. Полищук // Обзорная информация института «Черметинформация», 1976, сер. 8. – Вып. 2. – 21 с.
29. Шиндлер, К. Производство труб на пилигримовом стане / К. Шиндлер // Производство труб: материалы конференции, проведённой Обществом немецких металлургов совместно с Домом техники г. Эссене. – М.: Металлургия, 1980. – С. 56–64.
30. Донец, В.В. Распределение усилий при продольной прокатке труб на короткой оправке в зависимости от формы калибра / В. В. Донец, В. Я. Остренко, И. И. Бродский, Н. В. Кирсанов // Производство труб для нефтяной и газовой промышленности. – М.: Металлургия, 1981. – С. 13–18.
31. Остренко, В. Я. Усовершенствование калибровки валков автомат. станом / В.Я. Остренко, В.Г. Чус, И.И. Бродский // Обзорная информация института «Черметинформация», 1978. – Серия 8. – Вып. 2. – 19 с.
32. Сериков, С.В. Совершенствование методики расчёта многогранной калибровки валков / С.В. Сериков, Ю. М. Иосифов // Всесоюзная научно-техническая конференция «Совершенствование процессов продольной прокатки труб». – Челябинск, 1980. – С. 126–128.

33. Остряков, В.В. Повышение точности труб на агрегатах с автоматическим станом / В.В. Остряков, Ф.Д. Могилевский, Ю.М. Иосифов // Сталь. – 1979. – №10. – С. 768–788.

34. Иосифов, Ю. М. Влияние формы калибра на характер контактных напряжений и износ инструмента автоматического стана / Ю.М. Иосифов, Л. Л. Ситников, С.В. Сериков // Продольная прокатка труб. – Челябинск, 1980. – С. 104–106.

35. Блинов, Ю.И. Совершенствование профиля калибра автоматического стана / Ю. И. Блинов, С. В. Сериков, Ю. М Иосифов // Производство труб. – М.: Металлургия, 1979. – № 5. – С. 8–11.

36. Данченко, В.Н. Технология трубного производства: Учебник для ВУЗов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А.Романцев, С.В. Самусев – М.: Интермет, Инжиниринг, 2002, 640с.

37. Лубе, И. И. Исследование и совершенствование технологии горячей прокатки труб из непрерывнолитой заготовки на агрегатах с непрерывным станом / дис. Лубе И. И. канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 26.05.10. – М., 2010 – 147 с.

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

39. Гуляев, Ю. Г. Повышение точности и качества труб / Ю. Г. Гуляев, М. З. Володарский, О. И. Лев, С. А. Михеев, Г. П. Кострижев, С. А. Чукмасов. – М.: Металлургия, 1992. – 283 с.

40. Красиков, А.В. Исследование процесса раскатки труб на агрегатах с непрерывными станами с целью повышения износостойкости оправок. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2015.

41. Вердеревский, В.А. Трубопрокатные станы / В.А. Вердеревский, А.З. Глейберг, А.С. Никитин. – М.: Металлургия, 1983. – 240 с.

42. Calmes, A. A Seamless tube making by the Calmes process / A Calmes, C. Roberts. – Iron and Steel Engineer, 1958. – 124 p.

43. Jin, R. Development of MPM Tube Rolling Technology / R. Jin. – Baosteel Technology. – 2005. – p.10 – 14.
44. Zheng, Zh. Development of process technology of retained mandrel MPM / Zh. Zheng, Yu. Yekui. – Steel pipe. – 1999(10), Vol. 28, No. 5 – p. 1 – 6.
45. Jin, R. Development and present state of continuous restrained mandrel rolling processes / R. Jin. – Baosteel Technology. – 1989. No. 6 – p. 1 – 9.
46. Jin, R. A History of Seamless Steel Tube / R. Jin. – Steel pipe. – 2004, Vol. 33, No. 1 – p. 52 – 58.
47. Jin, R. Development of continuous rolling technology / R. Jin. – Steel pipe. – 2002, Vol.31, No.1 – p. 51 – 56.
48. Пат. 155159 HU. Production of seamless tubes / J.P. Calmes. – 1964 г.
49. Пат. 1450997 FR. Fabrication de tubes sans soudure / Tube Mill Holding Societe Anonyme residant dans le Grand-Duche de Luxembourg – 1966 г.
50. Пат. 1092718 GB. Production of Seamless Tubes / Tube Mill Holding Anonyme, a Luxembourg Company. – 1967 г.
51. Пат. 1115288 IT. Dispositivo per controllare la velocita del mandrino in laminatoi continui a mandrino tratenuto / Inncenti Santeustacchio S.p.A, Brascia, Italy. – 1977 г.
52. Пат. 4186585 US. Device for controlling the speed of a mandrel in continuous retained-mandrel rolling mills / Inncenti Santeustacchio S.p.A, Brascia, Italy. – 1980 г.
53. Jin, R. Tosa plants, CPS process and MINI-MPM / R. Jin. – Steel pipe. – 2003, Vol.32, No.3 – p. 57 – 59.
54. Zhou, X. Tube rolling technology analysis of MPM and PQF / Xiaofeng Zhou. – Research on Iron & Steel, 2008(6), Vol. 36, No.3. – p. 58 – 62.
55. Jin, R. 17 Year's Long History of PQF / Rusong Jin. – Steel Pipe, 2009(2), Vol. 38, No.1. – p. 36 – 40.

56. Gerd Pfeiffer. Geschichte der Fertigung von nahtlosen Rohren und die Rolle der Erfindungen der Gebrüder Mannesmann. Stahl und Eisen, 1985, 105 (22). – p. 85 – 90.
57. Montelatici L, Tarantola M. Application of Modern Technology Oriented Process Control Packages to Tube Mills Part II. TPT, 1998, 11 (1). – p. 67 – 71.
58. Theelen, N. PQF – Technologie für die Production naht-loser Stahlrohre / N. Theelen. – Stahl und Eisen, 2004, 124 (11). – p. 99 – 106.
59. Montelatici L, Cernuschi E. Technology and Process Development in Seamless Tube Production Result in Quality Improvements and Market Demands Satisfaction. ITA Conference Paper, Philadelphia, 1995. – p. 3 – 9.
60. Zhong, X. PQF & FQM three-roll mandrel mill / X. Zhong. – 2009(5) – p. 13 – 20.
61. Palma, V. The PQF mill – The ultimate process for high quality seamless tube production / V. Palma – SMS Meer Documentation, 1993.
62. Theelen, N. PQF technology for the production of the seamless steel tubes / N. Theelen, Yan ze Sheng. – Stahl und Eisen, 2004. – 106 p.
63. Schoenbeck, J. Strong interest in State-of-the art tube making technologies from markets worldwide / J. Schoenbeck. – MPT-International, 2008. – 29 p.
64. Теелен, Н. Современная технология для производства бесшовных труб на заводе в Тяньцзине / Н. Теелен, П. Ринальди, Д. Миланезе, Я. Цзешен // Metallургическое производство и технология. – 2005. – №1. – С.40–50.
65. Yan, Z. PQF Process / Z. Yan, Q. Sun, G. Zhuang. – Steel Pipe, 2006(2), Vol. 35, No.1. – p. 37 – 42.
66. Gao, R. Comparative Analysis of Two Roll – change Methods for PQF Mandrel Mill] / R. Gao, X. Zhou – Steel Pipe, 2012(12), Vol. 41, No.6. – p. 37 – 42.
67. Chen, B. Development and Comparative Analysis of 3-roll Mandrel Pipe Mills / B. Chen. – Steel Pipe, 2010(6), Vol. 39, No.3. – p. 60 – 62.
68. Романцев, Б. А. Особенности настройки рабочих клетей стана PQF / Б. А. Романцев, С. В. Кондратьев, Н. Е. Панюшкин, А.В. Гончарук // Сталь. – 2013. – №10. – 81–84.



69. Клачков, А. А. Опыт эксплуатации первого в России непрерывного стана с трехвалковыми клетями PQF 10 3/4" в ОАО «Тагмет» / А. А. Клачков // Сталь, 2011. – №11. – С.85–88.
70. Струин, Д.О. Совершенствование технологии продольной прокатки труб на основе создания и использования новых научно обоснованных технических решений / дис. Д.О. Струин. канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 14.12.16. – Ч., 2016 – 170 с.
71. Ku, H. Development of Structure of 3-roll Mandrel Pipe Mills and Relevant Comparative Analysis / H. Ku, G. Xiao, Y. Chang, P. Zhang. – Steel Pipe, 2015(6), Vol. 44, No.3. – p. 59 – 62.
72. Wu, J. Characteristics of Manufacturing Process and Equipment of  $\varnothing 508$  mm PQF 3 roll Mandrel Pipe Mill / J. Wu. – Steel pipe. – 2013(6), Vol. 42, No. 3 – p. 44 – 50.
73. 3-валковый стан с удерживаемой оправкой FQM<sup>TM</sup> для производства высококачественных бесшовных труб // DaNews, 2006(6), с. 54.
74. Cernuschi, E. FQM<sup>TM</sup>: Danieli 3-Roll Pass Retained Mandrel Mill for High Quality Seamless Tube Production / E. Cernuschi. – Iron and Steel. – 2008(12), Vol. 43, No. 12 – p. 92 – 95.
75. Зуев, М. Северский трубный завод: традиции уверенного роста / М. Зуев. – Metallurg. – 2014. – №7. – с. 10 – 11.
76. Столетний, М. Ф. Точность труб / М. Ф. Столетний, Е. Д. Клемперт. – М.: Metallurgiya, 1975. – 240 с.
77. Fan, Q. Advanced technologies and equipment applied to  $\varnothing 159$  FQM 3-roll mandrel mill plant / Q. Fan. – Sichuan Metallurgy – 2007(2), Vol. 29, No. 1 – p. 19 – 22.
78. Ершов, Ю. Л. PQF/МРМ – особенности проектирования непрерывного оправочного стана / Ю. Л. Ершов, Б. И. Тартаковский // Теория и практика металлургии, 2009. – №5–6. – С. 3–14.

79. Ершов Ю. Л. Особенности проектирования непрерывных оправочных станов с двух – и трехвалковыми клетями / Ю. Л. Ершов, Б. И. Тартаковский // Бюллетень «Черная металлургия». – М.: ОАО «Чермет информация», 2011. – №10. – С.80–91.

80. Сравнительный анализ процесса оправочной продольной прокатки труб с использованием калибров, образованных разным количеством валков / А. В. Выдрин, И. Н. Черных и др. // Трубы–2014: труды XXII научно-практической конференции: Ч.2 – С. 143 –150.

81. Струин, Д. О. Экспериментальные исследования калибровки валков оправочных станов продольной прокатки / Д. О. Струин, И. Н. Черных. // Наука ЮУрГУ. Материалы 65-й научной конференции секции технических наук. – Т.2. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 15–18.

82. Струин, Д. О. Исследование точности проката на ТПА со станом PQF / Д. О. Струин // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А.Ф. Головина: материалы 6-ой молодёжной научно-практической конференции г. Екатеринбург. – Екатеринбург, 2013. – С. 499-501.

83. Анализ калибровки калибра 265 мм и скоростных режимов стана PQF / А. В. Выдрин, В.Г. Шеркунов, А. В. Никитюк, Д. О. Струин, А. В. Поливец, С. Б. Верхогляд // Трубы–2011: труды XIX Международной научно-практической конференции: Ч. 2. – Челябинск, 2012. – С. 300–306.

84. Пьянков, Б. Г. Разработка компьютерной модели ТПА со станом FQM для определения степени влияния возмущающих параметров на результаты процесса прокатки / Б. Г. Пьянков, А. В. Выдрин, В. В. Широков // ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии: сб. докладов международного научно-технического конгресса. – М, 2014. – С. 95–101.

85. Струин, Д. О. К вопросу определения геометрических параметров при прокатке труб в трехвалковых калибрах / Д. О. Струин. – Научный поиск. Технические науки: материалы третьей науч. конф. аспирантов и докторантов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 72–81.

86. Патент RU 2530591 С 2: Калибр трубопрокатного стана / Д. А. Лившиц, И. Ю. Пышминцев, А. А. Клачков, А. В. Выдрин, Д. О. Струин, и др. – Опубликовано 10.10.2014 г. – Бюллетень № 25.
87. Швейкин, В. В. Причины образования поперечных трещин на трубах при прокатке в круглом калибре на оправке / В. В. Швейкин // Сталь. – 1949. – №3.
88. Матвеев, Ю. М. Калибровка валков и инструмента трубных станов / Ю. М. Матвеев, Я. Л. Ваткин. – М.: Metallurgizdat, 1951. – 412 с.
89. Ваткин, Я. Л. Исследование деформации трубы при прокатке в круглом калибре на длинной оправке / Я. Л. Ваткин, А. А. Шевченко, Г. И. Гуляев и др. // Обработка металлов давлением: научные труды ДМЕТИ. – М.: Metallurgiya, 1967. – №53. – С. 169–177.
90. Данченко, В.Н. Распределение продольных напряжений при прокатке труб на оправке // В.Н. Данченко, А.А. Заяц. Обработка металлов давлением. Сборник научных трудов № 59 – М.: Metallurgiya, 1976. – с. 280 – 286.
91. Чекмарев, А. П. Основы прокатки труб в круглых калибрах / А. П. Чекмарев, Я. Л. Ваткин – М.: Metallurgizdat, 1962. – 222 с.
92. Данилов, Ф. А. Горячая прокатка труб. / Ф. А. Данилов, А. З. Глейберг, В. Г. Балакин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgiya, 1962. – 615 с..
93. Данченко, В. Н. Развитие теории процессов непрерывной прокатки труб // В. Н. Данченко. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – С. 94 – 133.
94. Шевченко, А. А. Опыт калибровки валков непрерывных станов / А. А. Шевченко, Я. Л. Ваткин, А. П. Савкин и др. / Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Д.: ВНИТИ, 1968. – С. 78–83.
95. Матвеев, Ю. М. Калибровка инструмента трубных станов / Ю. М. Матвеев, Я. Л. Ваткин. – М.: Metallurgiya, 1970. – С. 193–204.
96. Ваткин, Я. Л. Исследование деформации трубы при прокатке в круглом калибре на длинной оправке: обработка металлов давлением / Я. Л. Ваткин, А. А.

Шевченко, Г. И. Гуляев, В. М. Друян, И. А. Чекмарев, И. П. Савкин, В. Н. Данченко. – М.: Металлургия, 1967. – 256 с.

97. Лавров, П. П. Определение основных параметров при прокатке труб в непрерывном стане на длинной оправке / П. П. Лавров. – М., 1963. – №8. – С. 193–212.

98. Гуляев, Г. И. Особенности деформации труб при непрерывной прокатке на длинной оправке / Г. И. Гуляев, И. П. Савкин, И. А. Чекмарев и др. // Производство труб: сборник – М.: Металлургия, 1971. – № 26 . – С. 31–36.

99. Савкин, И. П. Исследование деформации металла и усилий при прокатке труб на непрерывном оправочном стане / Автореферат диссертационной работы, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Днепропетровск, 1966. – 25 с.

100. Хохряков, В.И. Совершенствование калибровки и улучшение качества труб на семиклетевом непрерывном стане / В.И. Хохряков, Ю.И. Блинов, И.А. Грехов, Ю.А. Поповцев, В.Ф. Гонец // Производство труб. – М.: Металлургия, 1979. – № 5. – С. 8–11.

101. Шевакин, Ю.Ф. Производство труб / Ю.Ф. Шевакин, А.З. Глейберг. – М.: Металлургия, 1968. – 440 с.

102. Струин, Д.О. Мониторинг точности труб по линии ТПА со станом PQF / Д. О. Струин, И. Н. Черных, А. В. Король, В. Г. Шеркунов, А. В. Зинченко, С. Б. Верхогляд, В. А. Кутепов // Трубы–2012: труды XX юбилейной научно-практической конференции: Ч. 2. – 2012. – Сочи, 2012. – С. 9–10.

103. Yue, Sh. Design and Development of  $\varnothing 382$  mm Pass of PQF Mill / Sh. Yue, Y. Liu, H. Guo. – Steel Pipe, 2009, Vol. 38, No.3. – p. 46 – 49.

104. Zhang, Y. Development of Pipe-end Sharpening Technique with and Application to  $\varnothing 159$  mm FQM / Y. Zhang, H. Xia, J. Chen. – Steel Pipe, 2010, Vol. 39, No.6. – p. 31 – 35.

105. Li, X. Optimized Design and Application of Rolls of  $\varnothing 258$  mm PQF Mandrel Mill / X. Li, Q. Bai, X. Zhou, X. Yin. – Steel Pipe, 2012, Vol. 41, No.1. – p. 64 – 68.

106. Wang, X. Optimization of process Equipment and production Practice of  $\varnothing 460$  mm PQF Plant / X. Wang, W. Yang, F. Hu, K. Xia, C. Bai. – Steel Pipe, 2014, Vol. 43, No.3. – p. 49 – 54.

107. 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.

108. Поляков, М.Г. Деформация металла в многовалковых калибрах / М.Г. Поляков, Б.А. Никифоров, Г.С. Гун. – М.: Metallurgia, 1979. – 240 с.

109. Шевакин, Ю.Ф. Производство труб / Ю.Ф. Шевакин, А.П. Коликов, Ю.Н. Райков. – М.: Интермет инжиниринг, 2005. – 568 с.

110. Пат. 2357815 RU, B21B 17/04. Способ удлинительной прокатки с использованием стана для прокатки бесшовных труб на оправке / Sumitomo Metal Ind. – 10.06.2009 г.

111. Пат. 1614875 SU, B21B 17/14. Технологический инструмент двухвалкового редуционного стана / Всесоюзный научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности. – 23.12.1990 г.

112. Пат. 973199, B21B 17/02, B21B 27/02. Технологический инструмент для продольной прокатки труб / Уральский научно-исследовательский институт трубной промышленности. – 15.11.1982.

113. Пат. 2973851 JP B21B 17/02, B21B 17/04. Continuous rolling method for tube and 3-roll mandrel mill / Sumitomo Metal Ind. – 23.07.1996 г.

114. Старченко, Д.И. Кинематика продольной прокатки. Учебное пособие. – К.: НМК ВО, 1992. – 276 с.

115. Грудев, А.П. Захватывающая способность прокатных валков. – М: “СП Интермет Инжиниринг”, 1998. – 283 с.

116. Кириченко, А.Н. Пути улучшения условий захвата при продольной прокатке труб на оправке / А.Н. Кириченко, В.Б. Славин, М.Б. Биск и др. // Сб “Продольная прокатки труб” Тезисы Всесоюзной научно-технической

конференции “Совершенствования процессов продольной прокатки труб” – Челябинск, 1980, С. 93-94.

117. Новиков, А. Г. Исследование кинематики и динамики процесса прокатки труб на длинной оправке: дис. канд. техн. наук А. Г. Новикова; науч. рук. В. Н. Выдрин; ЧПИ им. Ленинского комсомола; ЮУрГУ. – Челябинск: Б. И. 1965. – С. 8–9.

118. Fu, B. Commissioning and trial production of the PQF  $\varnothing$ 460 hot rolling line at Yantai Baosteel Pipe / B. Fu, W. Yang, Sh. Zhang. – Baosteel Technology, 2013, No.3. – p. 75 – 80.

119. Гуляев, Г.И. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб / Г. И. Гуляев, П. Н. Ившин, И. Н. Ерохин, А. К. Зимин и др. – М.: Metallurgy, 1975. – 264 с.

120. Янович, В. К. Устойчивость поперечного профиля труб при горячем и холодном редуцировании: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук / В. К. Янович. – Днепропетровск, 1979. – 21 с.

121. Гуляев, Г. И. Выбор величин уширения при редуцировании труб / Г. И. Гуляев, А. И. Довгаль // Сталь. – 1965. – №6. – С. 62–64.

122. Широков, В.В. Разработка методики расчёта скоростных режимов прокатки труб на непрерывных раскатных станах / дис. В.В. Широков. канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением» – Ч., 2017 – 171 с.

123. Пат. 2357814 RU. Способ изготовления бесшовной стальной трубы / Sumitomo Metal Industries. – 2006 г.

124. Гамидов, Ф.Дж. К вопросу влияния калибровки и точности изготовления оправок автоматического стана на качеству труб / Ф.Дж. Гамидов, С.Р. Рахманов // Теория и практика металлургии. – 2012. – №4. – С. 28 – 30.

125. Sun, Sh. Development of technology of PQF process for rolling Heavy-wall, Extra-sort tube / Sh. Sun, X. Guan, H. Ding, Sh. Ma. – Steel pipe, 2016, Vol. 45. No.4. – p. 42 – 45.

126. Чекмарев, А.П. Внеочаговые силы трения на оправке при прокатке труб / А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин, И.А. Чекмарев, В.Н. Данченко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1969. – №6. – С. 80-82.
127. 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.
128. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел – М: Мир, 1986. – 346 с.
129. Onwubolu, G.C. New Optimization Techniques in Engineering / Godfrey C. Onwubolu, V. V. Babu – Springer, 2013. – P. 712.
130. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян Учебник для студентов машиностроительных и металлургических вузов. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
131. Грудев, А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1988, 240 с.
132. Никитин, Г.С. Теория продольной прокатки: Учебное пособие / Г.С. Никитин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 399 с.
133. Baines, K. Lead as a model material to simulate mandrel rolling of hot steel tube / K. Baines // Journal of Materials Processing Technology, 2001. – V. 118. – P. 422–428.
134. Струин, Д. О. Методика расчета площади поперечного сечения очага деформации, при прокатке труб в трехвалковых калибрах / Д. О. Струин, В. Г. Шеркунов, А. В. Выдрин и др. // Сталь. – 2012. – № 12. – С. 41–44.
135. Nocedal J. Numerical Optimization / Jorge Nocedal, S. Wright – Springer Science & Business Media, 2006. – P. 664.
136. Wenyu, S. Optimization Theory and Methods – Nonlinear Programming / Wenyu Sun, Ya-Xiang Yuan – Springer Science & Business Media, 2006. – P. 688.
137. Безденежных, А.А. Математические модели химических реакторов / А.А. Безденежных. «Техніка», 1970. – 176 с.

138. Kobayashi, S. Metallforming and the Finite-Element Method. / S. Kobayashi, S.I. Oh, T. Altan // Oxford University Press, 1989.
139. Gorni, A.A. Steel forming and heat-treating – handbook / A.A. Gorni. – Brazil, São Vicente, 2009. – 102p.
140. Кассандрова, О.Н. Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандрова. В.В. Лебедев: Руководство по обработке результатов измерений. – Москва: Изд-во «Наука», 1970. – 109 с.
141. Фаддеев, М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента: учебное пособие / М.А. Фаддеев. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2002. – 108 с.
142. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением. // А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. Справ. изд. – М: Metallurgy, 1982, С. 312.
143. Зиновьев, А.В. Теория обработки металлов давлением. Раздел: Трение в процессах прокатки. Учебное пособие. – Москва. 1983. С. 80.
144. Николаев, В.А. К расчету коэффициента трения при горячей прокатке стали // Изв. вузов. Черная металлургия. 1994 № 11. С 21 – 25.
145. Коновалов, Ю. В. Справочник прокатчика: в 2 кн. Кн. 1 Производство горячекатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М.: Теплотехник, 2008. – 640 с.
146. Данченко, В.Н. Развитие теории процессов непрерывной прокатки труб // В.Н. Данченко. Теоретические проблемы прокатного производства: Труды V Международной научно-технической конференции. Днепропетровск, 2000, С. 300 – 302.
147. 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 и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Металлургия. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ. — 2015. – Т. 15, № 3. – С. 139–147.



148. 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.

149. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.

150. Мочалов Н.А. Пластометрические исследования металлов/ Н.А. Мочалов, А.М. Галкин, С.Н. Мочалов, Д.Ю. Парфёнов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2003. – 318 с.

151. Зильберг Ю.В. Теория обработки металлов давлением: Монография. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 434 с.

152. 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.

## Приложение А – Акт внедрения методики расчета оптимальной калибровки валков чистовых клетей трехвалкового непрерывного раскатного стана



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

методики расчета оптимальной калибровки валков чистовых клетей  
трехвалкового непрерывного раскатного стана

В результате выполнения научно-исследовательской работы «Анализ и сопровождение технологии производства труб в ТПЦ-1 на период пуска стана FQM» с 2014 по 2016 гг. младшим научным сотрудником лаборатории продольной прокатки ОАО «РосНИТИ» Е.А. Шкуратовым совместно со специалистами ПАО «СТЗ» разработаны мероприятия, способствующие получению горячекатаных бесшовных труб, отвечающих повышенным требованиям, предъявляемым к точности геометрических параметров.

В результате выполнения научно-исследовательской работы:

- численно отражена взаимосвязь между параметрами процесса прокатки по линии ТПА со станом FQM, параметрами прокатного инструмента и точностью геометрических параметров готовых труб;

- разработана методика расчёта оптимальной величины овальности калибров чистовых клетей трёхвалкового непрерывного раскатного стана с учетом системы ограничений параметров процесса прокатки для технологии FQM;

- с использованием методики расчета оптимальной величины овальности калибров чистовых клетей трёхвалкового непрерывного раскатного стана разработан и всесторонне исследован новый калибр трёхвалкового непрерывного раскатного стана;

Оценка результатов расчёта параметров процесса прокатки, полученных с использованием разработанной методики расчета, была проведена в марте 2016 г. в условиях ТПЦ-1 ПАО «СТЗ» в процессе мониторинга технологии изготовления труб наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 8,0 мм. При сопоставлении расчётных данных с данными промышленной прокатки погрешность не превышала 2%. Также, на основании данных мониторинга технологии, установлено и научно обосновано, что использование разработанного нового калибра трёхвалкового непрерывного раскатного стана в четвёртой клети стана FQM позволяет снизить поле отклонений по толщине стенки на готовых трубах не менее чем в 1,5 раза.

Результаты исследования Е.А. Шкуратова используются в повседневной работе специалистов ПАО «СТЗ», а использование нового калибра трёхвалкового непрерывного раскатного стана в дальнейшем позволит с максимальным выходом целевой продукции освоить новые виды продукции с повышенными требованиями к геометрическим параметрам готовых труб.

Руководитель службы качества

Р.О. Бушин

Начальник технического отдела

В.Л. Пятков

Начальник трубопрокатной лаборатории

О.А. Панасенко

## Приложение Б – Акт внедрения результатов диссертационной работы в процесс проектирования новой системы калибров стана FQM



УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор ПАО «СТЗ»

В.А. Топоров

03 2017 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Шкуратова Евгения Александровича  
в процесс проектирования новой системы калибров стана FQM

Настоящий Акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Научного сотрудника лаборатории продольной прокатки ОАО «РосНИТИ» Е.А. Шкуратова были внедрены в процесс проектирования новой системы калибров стана FQM, в частности, с учетом граничных условий процесса прокатки определены рациональные параметры калибра последней клетки, способствующего повышению выхода годной трубной продукции с первого предъявления, уменьшению количества дефектов поверхности прокатного происхождения, повышению точности труб, уменьшению величины концевой обрезки, рациональному использованию эксплуатационного ресурса прокатного инструмента и оборудования стана FQM.

Кроме того, разработанные мероприятия позволили осуществить анализ технологии раскатки гильз с использованием действующей и новой систем калибров, разработанных специалистами «Danieli», выявить наиболее узкие места, как с точки зрения повышения качества наружной поверхности и точности по толщине стенки готовых труб, так и определения незадействованных резервов технологии, способствующих повышению качества готовых труб и уменьшению вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Начальник технического отдела

Начальник НИЦ

В.Л. Пятков

А.И. Степанов

## Приложение В – Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс АО «ВТЗ»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе,

доктор технических наук,

профессор



А.А. Радионов

05

2017 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Шкуратова Евгения Александровича  
в учебный процесс

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе АО «ВТЗ» результатов кандидатской диссертационной работы Е.А. Шкуратова.

Представленные в диссертационной работе материалы, связанные с совершенствованием процесса продольной прокатки труб на непрерывном раскатном стане, основанные на разработке принципиально нового подхода к повышению точности труб по толщине стенки базирующего на решении оптимизационной задачи, учитывающего наиболее значимые управляющие параметры процесса прокатки и научно обоснованную систему ограничений 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), г. Челябинск.

Заведующий кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением», ЮУрГУ, кандидат технических наук, доцент

Л.В. Радионова

Декан факультета материаловедения и металлургических технологий кандидат технических наук

М.А. Иванов

**Приложение Г – Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс ЮУрГУ**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе,

доктор технических наук,

профессор



\_\_\_\_\_ А.А. Радионов

\_\_\_\_\_ 05 \_\_\_\_\_ 2017 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов диссертационной работы Шкуратова Евгения Александровича  
в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Е.А. Шкуратова 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» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск.

Заведующий кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением», ЮУрГУ,  
кандидат технических наук, доцент

Л.В. Радионова

Декан факультета материаловедения  
и металлургических технологий  
кандидат технических наук

М.А. Иванов

## Приложение Д – Модуль для расчета геометрических параметров чистовых калибров на каждом шаге ОПТИМИЗАЦИИ

Mathcad - [Модель расчета координат]
Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Обычный Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

Исходные данные:

$R_k := 192$  - радиус калибра (половина высоты калибра);  
 $\alpha_v := 30$  - угол выпуска;  
 $\alpha := 30 + \alpha_v$  - угол отсчета от горизонтальной составляющей (ось  $ox$ );  
 $\Delta E := 10^{-10}$  - константа смещения радиуса обжимной зоны;  
 $E := \Delta E + 0$  - эксцентриситет радиуса обжимной зоны

Координаты точки сопряжения радиусов обжимной зоны и зоны выпуска калибра:

$$x_{тс} := \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \frac{E \cdot \sin\left[90 - \alpha - \arcsin\left(\frac{E \cdot \sin\left[(120 + \alpha_v) \cdot \frac{\pi}{180}\right] \cdot \frac{180}{\pi}\right)}{R_k + E}\right] \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\pi}{180}}{\sin\left[\arcsin\left(\frac{E \cdot \sin\left[(120 + \alpha_v) \cdot \frac{\pi}{180}\right] \cdot \frac{180}{\pi}\right)}{R_k + E}\right]}$$

$$y_{тс} := \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \frac{E \cdot \sin\left[90 - \alpha - \arcsin\left(\frac{E \cdot \sin\left[(120 + \alpha_v) \cdot \frac{\pi}{180}\right] \cdot \frac{180}{\pi}\right)}{R_k + E}\right] \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\pi}{180}}{\sin\left[\arcsin\left(\frac{E \cdot \sin\left[(120 + \alpha_v) \cdot \frac{\pi}{180}\right] \cdot \frac{180}{\pi}\right)}{R_k + E}\right]}$$

$x_{тс} = 96$   
 $y_{тс} = 166.277$

1. Граничные условия калибра по построению:

а) Минимальная ширина и овальность калибра:

$$B_{min} := \frac{\sin\left[60 - \arcsin\left(\frac{\sqrt{3} \cdot E}{2(R_k + E)}\right) \cdot \frac{180}{\pi}\right] \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot E}{\sin\left[\arcsin\left(\frac{\sqrt{3} \cdot E}{2(R_k + E)}\right)\right]} \quad \Theta_{min} := \frac{B_{min}}{R_k}$$

$B_{min} = 192$   
 $\Theta_{min} = 1$

б) Максимальная ширина и овальность калибра:

$$B_{max} := \frac{\left[\sqrt{R_k \cdot (R_k + 2 \cdot E)} - E \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right] \cdot \sin\left[90 + \arcsin\left(\frac{E \cdot \sin\left[(120 + \alpha_v) \cdot \frac{\pi}{180}\right] \cdot \frac{180}{\pi}\right)}{R_k + E}\right] \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\pi}{180}}{\sin\left[180 - \left[90 + \arcsin\left(\frac{E \cdot \sin\left[(120 + \alpha_v) \cdot \frac{\pi}{180}\right] \cdot \frac{180}{\pi}\right)}{R_k + E}\right] - \alpha_v \cdot \frac{\pi}{180}\right]}$$

$B = 208.47551$

2. Расчет радиуса выпуска калибра:

$$bE := \sqrt{E^2 + B^2} + E \cdot B \quad \Theta_{max} := \frac{B_{max}}{R_k} \quad B_{max} = 221.703 \quad \Theta_{max} = 1.155$$

$$\zeta := \left[\pi - \left(\frac{2\pi}{3} + \alpha_v \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \arcsin\left(\frac{E \cdot \sin\left[(120 + \alpha_v) \cdot \frac{\pi}{180}\right] \cdot \frac{180}{\pi}\right)}{R_k + E}\right] \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\rho := \frac{(E + R_k)^2 + bE^2 + 2(E + R_k) \cdot bE \cdot \cos\left[\left(\zeta + \delta\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right]}{2 \cdot \left[(E + R_k) + bE \cdot \cos\left[\left(\zeta + \delta\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right]\right]}$$

$bE = 208.476$   
 $\zeta = 30$   
 $\delta = 120$

3. Координаты центра радиуса выпуска:

$$bc := \frac{\left[\rho - (R_k + E)\right] \cdot \sin\left(\zeta \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\sin\left[180 - (\zeta) \cdot \frac{\pi}{180}\right]} \quad bc = 288 \quad OX_{\rho} := -\left(\sin\left(\zeta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot bc\right)$$

$$OY_{\rho} := -\left(E + \cos\left(\zeta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot bc\right) \quad OX_{\rho} = -144 \quad OY_{\rho} = -249.416$$

$\rho = 480$

$B_{min1} := 192$     $B_{max1} := 221.703$   
 $\Theta_{min1} := 1$     $\Theta_{max1} := 1.155$

в) Графическое отображение результатов:

Нажмите F1, чтобы открыть справку. АВТО NUM Страница 1