

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

На правах рукописи



Струин Дмитрий Олегович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОДОЛЬНОЙ
ПРОКАТКИ ТРУБ НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
НОВЫХ НАУЧНО ОБОСНОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор В.Г. Шеркунов

Челябинск 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений	5
Введение	12
1 Состояние вопроса и постановка задач исследования	18
1.1 Особенности технологии непрерывной раскатки труб в трёхвалковых калибрах на удерживаемой оправке	18
1.2 Исследование параметров формоизменения раската при прокатке в калибрах на оправке	26
1.3 Влияние геометрических параметров прокатного инструмента на качество труб	31
1.4 Уровень изученности процесса прокатки труб в калибрах на оправке на основании патентных исследований.....	38
1.5 Выводы и постановка задач исследования	40
2 Теоретические исследования процесса продольной прокатки труб в трёхвалковых калибрах. Разработка эффективной системы калибров трёхвалкового непрерывного раскатного стана	42
2.1 Расчёт оборотов валков по клетям стана PQF	42
2.2 Математическая модель и алгоритм расчёта геометрических параметров очага деформации	44
2.3 Численная оценка зависимостей для расчёта параметров процесса прокатки в трёхвалковых калибрах	53
2.4 Сравнительная оценка расчёта параметров процесса прокатки по существующей и предложенной методике расчёта	57
2.5 Мониторинг технологии прокатки труб на ТПА с трёхвалковым непрерывным раскатным станом	63
2.5.1 Основные положения	63
2.5.2 Численная оценка характеристик точности раската по горячему переделу на ТПА со станом PQF	67

2.6	Анализ особенностей формоизменения раската в системах калибров стана PQF	75
2.7	Анализ калибровки валков стана PQF	81
2.8	Разработка новой системы калибров стана PQF	87
2.9	Выводы по главе	92
3	Исследование процесса продольной прокатки труб.....	94
3.1	Постановка задач экспериментального исследования.....	94
3.2	Физическое моделирование процесса продольной прокатки труб с использованием нового калибра непрерывного раскатного стана	94
3.2.1	Оборудование для физического моделирования	94
3.2.2	Проведение исследований и анализ результатов.....	95
3.3	Компьютерное моделирование процесса прокатки труб в трёхвалковых калибрах	101
3.3.1	Показатели напряжённо-деформированного состояния	101
3.3.2	Компьютерное моделирование процесса прокатки труб с использованием различных систем калибров стана PQF 190 мм.....	102
3.3.3	Методика расчёта показателей напряжённого состояния раската при прокатке на непрерывном раскатном стане с использованием различных систем калибров	114
3.4	Выводы по главе	121
4	Реализация разработанных технических решений в промышленных условиях.....	122
4.1	Испытания новой системы калибров стана PQF.....	122
4.1.1	Испытания системы калибров стана PQF 190 мм.....	122
4.1.2	Испытания системы калибров стана PQF 265 мм.....	133
4.2	Выводы по главе	140
	Выводы по работе	142
	Список литературных источников	144
	Приложение А – Калибровка валков стана PQF	163
	Приложение Б – Новая калибровка валков NRD для клеток 1, 2 стана PQF.....	164

Приложение В – Новая калибровка валков стана PQF	165
Приложение Г – Новая калибровка валков для проведения исследований на ЭУ–ПППТ	166
Приложение Д – Акт внедрения математической модели расчёта геометрических параметров очага деформации трёхвалкового непрерывного раскатного стана.....	168
Приложение Е – Акт о внедрении результатов работы в учебный процесс	169
Приложение Ж – Акт о внедрении результатов работы в учебный процесс	170

Список сокращений и условных обозначений

- ОАО «РосНИТИ» – Открытое акционерное общество «Российский Научно-Исследовательский Институт Трубной Промышленности»;
- ПАО «ТАГМЕТ» – Публичное акционерное общество «Таганрогский Металлургический завод»;
- ПАО «СТЗ» – Публичное акционерное общество «Северский трубный завод»;
- АО «ВТЗ» – Акционерное общество «Волжский Трубный Завод»;
- ПАО «СинТЗ» – Публичное акционерное общество «Синарский Трубный Завод»;
- SMS Meer – часть ассоциированных предприятий «SMS group»;
- Danieli – концерн, специализирующийся на разработке, проектировании и выпуске машиностроительного оборудования для металлургической отрасли (г. Бутрио, Италия);
- НРС – непрерывный раскатной стан с удерживаемой или плавающей оправкой;
- PQF – Premium Quality Finishing, трёхвалковый пятиклетевой НРС с удерживаемой оправкой (ПАО «ТАГМЕТ»);
- FQM – Fine Quality Mill, трёхвалковый пятиклетевой НРС с удерживаемой оправкой (ПАО «СТЗ»);
- МРМ – Multistand Pipe Mill, двухвалковый семиклетевой НРС с удерживаемой оправкой (АО «ВТЗ»);
- ТПА – трубопрокатный агрегат;
- ИКС – извлекательно-калибровочный стан (ПАО «ТАГМЕТ»);
- РРС – редукционно-растяжной стан (ПАО «ТАГМЕТ»);
- ИС – стан-извлекатель (ПАО «СТЗ»);

- КС – калибровочный стан (ПАО «СТЗ»);
- СК – система калибров НРС;
- УЗК – ультразвуковой контроль;
- РКМ – расходный коэффициент металла;
- ЭУ-ПППТ – экспериментальная установка для исследования процесса продольной прокатки труб (ОАО «РосНИТИ»);
- НКВ – новая калибровка валков;
- NRD – новая калибровка валков стана продольной прокатки труб (NRD - new roll design, НКВ);
- СК NRD – новая система калибров НРС;
- СК SMS – система калибров стана PQF, разработанная фирмой «SMS Meer»;
- НС – непрерывный стан;
- ЧПУ – числовое программное управление;
- ТУ – технические условия;
- ТИ – технологическая инструкция;
- ПК – передний конец раската по горячему переделу и готовых труб;
- ЗК – задний конец раската по горячему переделу и готовых труб;
- ОД – очаг деформации;
- ММ – математическая модель;
- S – толщина стенки раската и готовых труб, мм;
- S_n – номинальная толщина стенки готовых труб, мм;
- ΔS – абсолютная разнотолщинность стенки раската и готовых труб, мм;

- $S_{\%}$ – относительная разнотолщинность стенки раската по горячему переделу и на готовых трубах, %
- $(\Delta S/S) \times 100$ – относительное обжатие толщины стенки раската по вершине калибра, % (далее по тексту - $\Delta S/S$);
- D/S – отношение наружного диаметра к толщине стенки готовых труб;
- u – относительная величина утонения или утолщения толщины стенки раската по выпуску калибра (знак «-» - утонение), %;
- D_B – диаметр бочки валка, мм;
- $D_{и}$ – идеальный диаметр валка (расстояние от оси вращения валка до оси прокатки), мм;
- $D_{дн}$ – диаметр валка по дну калибра, мм;
- L – ширина бочки валка, мм;
- H_i – высота калибра, мм;
- H_{NRD} – высота калибра NRD, мм;
- H_{NRD1} – условная высота калибра NRD, мм;
- B_i – ширина калибра, мм;
- B_i/H_i – величина овальности калибра (θ_i);
- Δ – зазор между валками, мм;
- μ – коэффициент вытяжки;
- e – величина сведения или разведения валков относительно номинального положения в соответствии с чертежом («+» - сведение, «-» - разведение), мм;
- φ_{03} – угол центральной обжимной зоны калибра, град;

- $\varphi_{\text{вып}}$ – угол выпуска калибра с учётом сведения или разведения валков, град;
- $l_{\text{од}}$ – длина очага деформации по вершине калибра в направлении прокатки, мм;
- $A_{\text{э}}$ – доля эксцентриситетности, в долях или %;
- $A_{\text{гр}}$ – доля гранёности, в долях или %;
- $R_{\text{в}}$ – радиус выпуска, мм;
- R – радиус центральной обжимной зоны калибра, мм;
- ε – эксцентриситет радиуса центральной обжимной зоны калибра в соответствии с чертежом, мм;
- $R_{\text{оп}}$ – радиус оправки, мм;
- $x_{\text{в}}, y_{\text{в}}$ – координаты центра радиуса выпуска калибра по построению, мм;
- x_i, y_i – координаты точек, соответствующих различным участкам поперечного сечения очага деформации, мм;
- $\alpha_{\text{в}}$ – угол выпуска калибра в соответствии с чертежом, град;
- $R_{\text{в2}}$ – радиус внутреннего профиля раската в зоне редуцирования очага деформации, мм;
- $\Delta_{\text{н}}$ – номинальная величина зазора между валками в клети по построению калибра, мм;
- $y_{\text{вс}}$ – ордината центра радиуса выпуска с учётом сведения или разведения валков;
- $\varphi_{\text{вер}}$ – угол центральной обжимной зоны калибра с учётом сведения или разведения валков, град;
- Δ_5 – величина зазора между оправкой и раскатом по вершине калибра в чистовых клетях НРС, мм;
- S_i – толщина стенки раската в вершине калибра, мм;

- R_{CD} – радиус сопряжения участков наружного профиля раската в зоне разъёма валков, мм;
- F_{OK} – площадь контактной поверхности раската с оправкой, мм²;
- $L_{МКЛ}$ – расстояние между клетями, мм;
- F_1 – площадь поперечного сечения очага деформации на выходе из клетки, мм;
- S_r – толщина стенки гильзы на входе в первую клетку НРС, мм;
- K_y – коэффициент, учитывающий утонение или утолщение толщины стенки раската по выпуску трёхвалкового калибра НРС;
- B_2 – ширина двухвалкового калибра, мм;
- B_3 – ширина трёхвалкового калибра, мм;
- $K_{П}$ – коэффициент, учитывающий влияние состояния поверхности и материала валка;
- K_M – коэффициент, учитывающий влияние марки стали;
- K_C – коэффициент, учитывающий скорость прокатки;
- T – температура металла, °С;
- $R_{дк}$ – радиус валка по дну калибра, мм;
- C_{pix} – количество пикселей, приходящихся на миллиметр длины толщины стенки раската, pix/мм;
- $S_{ф.pix}$ – фактическая толщина стенки раската в пикселях, pix;
- $S_{ф.мм}$ – фактическая толщина стенки раската, мм;
- $(X1;Y1), (X2;Y2)$ – координаты прямой на растровом изображении, pix;
- F_{pix} – площадь поперечного сечения очага деформации на выходе из клетки в пикселях, pix²;
- $F_{ф}$ – фактическая площадь поперечного сечения очага

деформации, мм^2 ;

$F_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения очага деформации, рассчитанная по разработанной ММ, мм^2 ;

Π_{F} – погрешность в расчёте при определении площади поперечного сечения очага деформации;

$F_{\text{гф}}$ – фактическая площадь поперечного сечения гильзы, мм^2 ;

$\mu_{\text{ф}}$ – фактический коэффициент вытяжки;

$\mu_{\text{п}}$ – коэффициент вытяжки, рассчитанный по разработанной ММ;

Π_{μ} – погрешность в расчёте при определении коэффициента вытяжки;

K_{λ} – коэффициент, характеризующий неравномерность распределения частных вытяжек по периметру калибра;

K_{ν} – коэффициент, характеризующий неравномерность распределения окружной скорости вала по периметру калибра;

M – коэффициент, характеризующий неравномерность распределения частных вытяжек (K_{λ}) и окружной скорости вала (K_{ν}) по периметру калибра;

$F_{\text{наз}_i}$ – площадь участка раската по вершине калибра, ограниченная углом $\varphi_{\text{наз}}$ (участок NRD, выполненный по радиусу $R_{\text{наз}}$ и по прямой), мм^2 ;

$P_{\text{наз}_i}$ – периметр участка, ограниченного углом $\varphi_{\text{наз}}$, мм ;

σ_{S} – среднеквадратичное отклонение;

$S_{\text{ср}}$ – среднее значение толщины стенки раската, мм ;

$D_{\text{ср}}$ – средний наружный диаметр раската, мм ;

$B_{\text{рф}}$ – фактическая ширина раската в очаге деформации по линии разъёма валков, мм ;

- ΔB – показатель переполнения калибра, вычисляемый, как разница между шириной калибра с учётом изменения зазора между валками и фактической шириной раската по линии разъёма валков, мм;
- $B_{\%}$ – показатель переполнения калибра, %;
- $S_{\%г, ось ТПА}$ – относительная разнотолщинность стенки готовых труб, обусловленная разнотолщинностью стенки гильз и качеством осевой настройки оборудования линии ТПА, %.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы продольной горячей прокатки бесшовных труб на оправке и без оправки широко используются на современных трубопрокатных агрегатах (ТПА). На непрерывном раскатном стане обычно прокатывают передельные бесшовные трубы одного, двух или трёх наружных диаметров, весь сортамент требуемого наружного диаметра с заданной толщиной стенки получают на редуционно-растяжных и калибровочных станах. При этом характер распределения продольной и поперечной разнотолщинности стенки раската, а также относительная разнотолщинность стенки раската за непрерывным раскатным станом в значительной мере определяют состояние поверхности и разнотолщинность стенки готовых труб.

С каждым годом к горячекатаным бесшовным трубам предъявляют всё более жёсткие требования к относительной разнотолщинности стенки, предельным отклонениям по внутреннему или наружному диаметрам, овальности и кривизне. Поэтому проблема повышения точности геометрических параметров труб является одной из основных в трубопрокатном производстве. Анализируя технологию производства труб с точки зрения точности, необходимо учитывать множество технологических факторов и каждую из операций горячего передела, с целью определения влияния каждой из них на геометрические параметры раската. Научно обоснованный расчёт характеристик точности раската по горячему переделу, геометрических параметров очага деформации в клетях НРС, параметров процесса прокатки для группы непрерывных станов, выполненный на основании промышленных данных с использованием современного уровня техники, позволяет определить рациональные технические решения для совершенствования технологии продольной прокатки труб.

Значительный вклад в исследование процессов продольной горячей прокатки бесшовных труб внесли отечественные и зарубежные авторы: Я.Л. Ваткин, Г.И. Гуляев, В.М. Друян, Ф.А. Данилов, А.В. Чус, Ю. М. Матвеев, В.Н. Данченко, Ю. И. Блинов, А.В. Выдрин, М. Ф. Столетний, Е. Д. Клемперт, В.В. Швейкин, В.В. Ериклинцев и др.

Продольная и поперечная разнотолщинность стенки, величина внутренней овальности готовых труб в основном зависят от характера изменения геометрических параметров раската по горячему переделу, который взаимосвязан со схемой напряжённо-деформированного состояния раската, зависящей, в частности, от режимов деформации в НРС. Рациональной следует считать форму калибра НРС, обеспечивающую наиболее равномерное формоизменение металла как в отдельно взятом очаге деформации в *i*-ой клетки, так и для всей системы калибров НРС в целом. Такого результата, например, можно достичь путём увеличения количества валков, образующих калибр, в клетки НРС, поэтому в последнее время широкое распространение получили трёхвалковые НРС типа PQF и FQM.

Основными поставщиками оборудования для трёхвалковых НРС в настоящее время являются: немецкая фирма «SMS Meer» и итальянский концерн «Danieli». Обслуживание данных станов является дорогостоящим. Процесс раскатки гильзы в черновую трубу на трёхвалковом НРС с удерживаемой оправкой в недостаточной степени изучен в России и за рубежом. Режимы деформации рассчитываются по математическим моделям поставщиков оборудования, причём калибровки валков для группы непрерывных станов (PQF, ИКС, РРС) также разработаны поставщиками оборудования, однако, производителю не всегда удаётся достичь высокой точности геометрических параметров готовых труб в течение всей прокатной кампании. С учётом постоянного ужесточения требований, предъявляемым к геометрическим параметрам бесшовных труб, исследование новой технологии прокатки с использованием трёхвалковых НРС, её рациональная корректировка, совершенствование методик расчёта настроечных параметров с целью снижения разнотолщинности стенки и количества дефектов поверхности прокатного происхождения на готовых трубах являются *актуальными* в настоящее время.

Целью работы является совершенствование процесса продольной прокатки труб на трёхвалковом непрерывном раскатном стане, основанное на создании и использовании новых научно обоснованных технических решений,

обеспечивающих снижение разнотолщинности стенки и количества дефектов поверхности прокатного происхождения на готовых трубах.

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

- провести анализ существующей технологии процесса продольной прокатки труб на ТПА с непрерывным раскатным станом с использованием литературных и промышленных данных;
- разработать математическую модель расчёта параметров процесса продольной прокатки труб, позволяющую проводить научно обоснованный анализ технологии;
- разработать новые научно обоснованные технические решения, обеспечивающие снижение разнотолщинности стенки и количества дефектов поверхности прокатного происхождения на готовых трубах;
- провести в промышленных и лабораторных условиях экспериментальные исследования с целью проверки теоретических результатов работы и разработанных технических решений;
- выполнить промышленное опробование новых технических решений.

Научная новизна работы. Теоретические и экспериментальные исследования процесса продольной прокатки труб на трёхвалковом непрерывном раскатном стане позволили:

- впервые определить характер изменения геометрических параметров раската по всему горячему переделу и на готовых трубах для различного сортамента, а также провести численную оценку влияния геометрических параметров гильз на разнотолщинность стенки готовых труб;
- впервые получить аналитические зависимости для расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке с использованием различных видов калибров и с учётом изменения зазора между валками;
- разработать методику расчёта показателей напряжённого состояния раската, позволяющую определять рациональные режимы прокатки;

- разработать новую научно обоснованную калибровку валков для черновых клетей трёхвалкового непрерывного раскатного стана, позволяющую уменьшить разнотолщинность стенки готовых труб и количество дефектов поверхности прокатного происхождения.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработан, запатентован и всесторонне исследован новый технологический инструмент непрерывного раскатного стана «Калибр трубопрокатного стана» (Патент RU 2530591).

Разработан и запатентован новый технологический инструмент непрерывного раскатного стана «Оправочный узел непрерывного трубопрокатного стана» (Патент RU 2486976).

Разработана математическая модель расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке труб в трёхвалковом непрерывном раскатном стане с использованием различных видов калибров, с учётом изменения зазора между валками, позволяющая проводить анализ технологии процесса прокатки, расчёт режимов прокатки, неравномерности деформации и разрабатывать новые научно обоснованные технические решения.

Разработана научно обоснованная методика расчёта показателей напряжённого состояния раската в очаге деформации, позволяющая определять рациональные режимы прокатки и разрабатывать новые научно обоснованные технические решения.

Новые научно обоснованные технические решения опробованы в условиях ПАО «ТАГМЕТ» и частично внедрены. В частности изготовлены валки для новых СК стана PQF 190, 265 мм, осуществлены безаварийные опытно-промышленные прокатки, получены трубы наружным диаметром 168,3 мм и 219,0 мм. Анализ результатов опытно-промышленных прокаток позволил сделать вывод о возможности и целесообразности промышленного применения разработанных технических решений.

Результаты диссертационной работы реализованы в виде рекомендаций, внедрены на ПАО «ТАГМЕТ» и применяются в повседневной работе технологов.

Результаты работы внедрены в учебный процесс при профессиональной переподготовке специалистов АО «ВТЗ» в 2013-2015 г. по программе «Обработка металлов давлением» специализации «Трубное производство», разработанной Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)), в учебный процесс обучения технологического персонала УГПТ ТЩ-1 ПАО «СТЗ» в предпусковой период стана FQM в ноябре 2013 г., а также в процесс обучения студентов ЮУрГУ по направлению «Металлургия» и профилю «Обработка металлов давлением».

Апробация работы. Основные результаты исследований опубликованы в ряде научно-технических изданий и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе, международных: «Трубы-2011», «Трубы-2012», «Трубы-2014» (г. Челябинск), «IX Молодёжная научно-практическая конференция ТМК» (г. Сочи, 2013 г.), «Пятый международный промышленный форум и XIII Уральская промышленно-экономическая неделя» (г. Челябинск, 2013 г.), «Современные металлические материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.).

Работа выполнена на кафедре «Процессы и машины обработки металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный 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 труб на ТПА с трёхвалковым НРС; исследование характеристик точности геометрических параметров раската по горячему переделу в условиях ТПА с трёхвалковым НРС для различного сортамента; математическая модель расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке труб в трёхвалковом НРС с использованием различных видов калибров и с учётом изменения зазора между валками; экспериментальные

исследования формоизменения раската при прокатке на оправке с использованием нового калибра; исследование напряжённого состояния раската при прокатке в трёхвалковом НРС с использованием различных систем калибров; методика расчёта показателей напряжённого состояния раската в очаге деформации; результаты апробации новых технических решений в условиях ТПА с непрерывным раскатным станом RQF 10 $\frac{3}{4}$ ” ПАО «ТАГМЕТ».

Лабораторные исследования проводились в лаборатории продольной прокатки ОАО «РосНИТИ» на универсальном комплексе оборудования для исследования процессов продольной прокатки труб «ЭУ–ПППТ», опытно-промышленное изготовление труб осуществлялось в условиях ТПА с непрерывным раскатным станом RQF 10 $\frac{3}{4}$ ” ПАО «ТАГМЕТ».

Автор выражает благодарность за помощь в сборе данных, организации при проведении экспериментальных исследований и опытно-промышленных прокаток партий труб следующим специалистам: И.Ю. Пышминцеву, А.В. Выдрину, В.Г. Шеркунову, А.В. Никитюку, А.В. Зинченко, А.В. Поливцу, И.Н. Черных, А.В. Королю, А.Т. Кутепову, Е.В. Храмову, Е.А. Шкуратову, О.Е. Сарафановой.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Особенности технологии непрерывной раскатки труб в трёхвалковых калибрах на удерживаемой оправке

Прокатка металла в клетях с многовалковыми калибрами известна с 1854 года. Именно тогда появились первые сведения о создании фирмой «Tranton Iron Co» (Франция) стана универсального типа для прокатки балок [1]. В СССР большое внимание исследованиям и внедрению многовалковых калибров при производстве сортового проката уделялось в Магнитогорске (МГТУ), Челябинске (ЮУрГУ), Донецке (ДонНИИЧерМет), Днепропетровске (ДГТУ). Специалисты МГТУ внесли большой вклад в создание технологии прокатки в многовалковых калибрах биметаллической проволоки, проволоки из высокоуглеродистых и легированных сталей и сплавов, арматурной проволоки [1]. В Челябинском политехническом институте рассматривались вопросы применения многовалковых калибров для прокатки малопластичных металлов и сплавов [2], фасонных профилей высокой точности [3], калибровки сортовых профилей [4]. Использованием многовалковых калибров для калибровки сортового проката также занимались в ДонНИИЧерМете [5].

За рубежом широкое распространение получили трёхвалковые клетки, разработанные фирмой «Kocks». Применение многовалковых калибров в трубном производстве началось с редуционно-растяжных станов в 30-е годы XX-го столетия. В настоящее время клетки с многовалковыми калибрами также входят в состав трёхвалковых НРС типа PQF, FQM и речных станов.

В ОАО «РосНИТИ» исследование процессов деформации труб с использованием многовалковых калибров началось с 1970 года. Публикации ОАО «РосНИТИ», которые могут быть использованы для анализа и совершенствования технологии продольной прокатки труб в многовалковых калибрах в трубном производстве, приведены в работах [6-12]. Публикации поставщиков оборудования трёхвалковых НРС и иных организаций приведены в работах [13-28].

Известно, что ТПА с НРС имеют ряд преимуществ перед ТПА с автоматическими и пилигримовыми станами. Прокатка гильз на автоматическом стане ведётся в круглом или многогранном калибре на короткой неподвижной удерживаемой оправке, недостатками данного процесса прокатки [29-39] являются: повышенная разнотолщинность стенки готовых труб; незначительное обжатие раската по толщине стенки, обусловленное условием захвата; возникновение дефектов прокатного происхождения различного вида на внутренней и наружной поверхностях труб. Кроме того ТПА с автоматическими и пилигримовыми станами уступают в производительности ТПА с непрерывными раскатными станами, что подробно описано в работах [13, 40-48].

Первый стан PQF разработан фирмой «INNSE» еще в 1992 г. и поставлен «SMS Meer» (Германия) на ТПА 32–168 (КНР), пущенном в строй в 2003 г. [20]. Этот стан имеет в своём составе семь клеток трехвалкового типа. В 2006 году «SMS Meer» поставила пятиклетевой стан PQF на ПАО «ТАГМЕТ» [25], который в ноябре 2008 года был пущен в эксплуатацию. Для быстрой перевалки рабочие клетки стана PQF извлекаются из станины в боковом направлении, перпендикулярном оси прокатки. Внутри клетки каждый валковый узел размещен в П-образной кассете, устанавливаемой на рычаге, имеющем возможность поворота относительно своей оси, эксцентрично расположенной относительно оси прокатки. Поворот рычага для радиального сведения или разведения валка относительно номинального положения осуществляется с использованием гидравлического устройства, смонтированного в станине, которое регулирует высоту калибра в клетки при прокатке. Раскатку гильз в черновую трубу (раскат) осуществляют на длинной удерживаемой оправке.

Разработанный специалистами «Danieli» стан FQM [22], концептуально повторяет стан PQF, однако конструкция клеток этого стана лишена недостатков клеток стана PQF, который состоит в том, что радиальное перемещение валков осуществляется по дуге окружности вследствие применения поворотных устройств (рычагов) для осуществления сведения или разведения валков [62]. Регулировка

позиции валков в клетях стана FQM осуществляется строго в радиальном направлении.

Неотъемлемой особенностью современных НРС является использование: индивидуального привода валков с возможностью плавной регулировки числа оборотов; нажимных гидравлических устройств для настройки позиции валков и регистрации усилий на валки; систем контроля и автоматического регулирования параметров процесса прокатки.

Таким образом, современный уровень технологии и оборудования для производства бесшовных труб базируется на применении процесса прокатки гильз на удерживаемой оправке в последовательно установленных клетях с двухвалковыми (MPM) или трехвалковыми (PQF, FQM) калибрами. Извлечение раската с оправки осуществляется с использованием извлекательно-калибровочного стана, располагающегося за НРС на одной линии, и имеющим с ним общую ось прокатки.

По данным рекламных проспектов поставщиков оборудования «SMS Meer», «Danieli» основными преимуществами станов PQF, FQM в сравнении с непрерывными станами двухвалковой конструкции являются [18-20, 22, 23, 28, 49, 54]:

- меньшая неравномерность окружных скоростей по периметру калибра, за счёт чего достигается более равномерная деформация по толщине стенки раската;
- более равномерное распределение температуры по длине раската;
- меньший и равномерный износ валков;
- большая вытяжная способность трёхвалкового калибра;
- снижение растягивающих напряжений в выпусках калибра;
- меньшая неравномерность показателей напряжённого состояния раската, возникающих в теле раската при прокатке;
- прокатка высоколегированных марок сталей с наименьшим количеством дефектов прокатного происхождения различного вида;
- меньшее количество рабочих частей оправок, участвующих в производственном цикле;

- меньшая длина рабочей части оправки, в том числе, в сравнении с непрерывными станами с плавающей оправкой.

Необходимо отметить, что прокатка труб в трёхвалковых калибрах на удерживаемой оправке осуществляется в России на стане PQF только с 2008 года, а на стане FQM с июля 2014 года. В технической литературе особенности технологии прокатки горячекатаных бесшовных труб с использованием трёхвалковых НРС отражена недостаточно, поэтому для решения ряда задач целесообразно использовать имеющийся опыт при производстве труб в двухвалковых калибрах. При проведении данного анализа следует также учитывать, что на настоящий момент калибровки валков трёхвалковых НРС идентичны калибровкам двухвалковых НРС и выполнены с овальной обжимной зоной и с выпусками по радиусу, либо с круглой обжимной зоной и выпусками по радиусу (рисунки 1, 2).

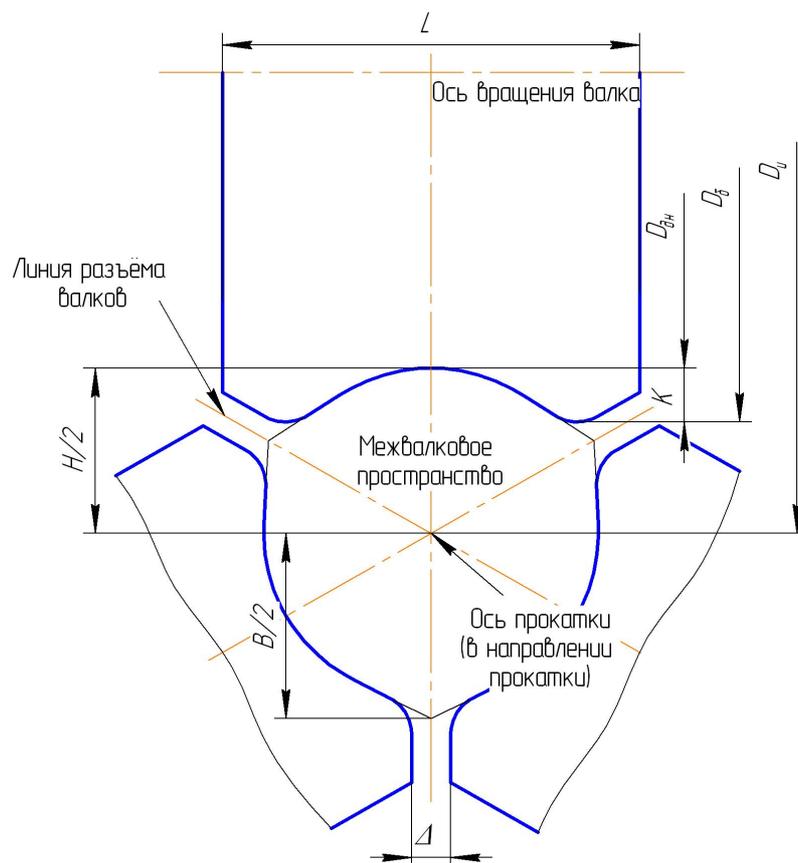


Рисунок 1 - Геометрические параметры:

- бочки валка;
- трёхвалкового калибра

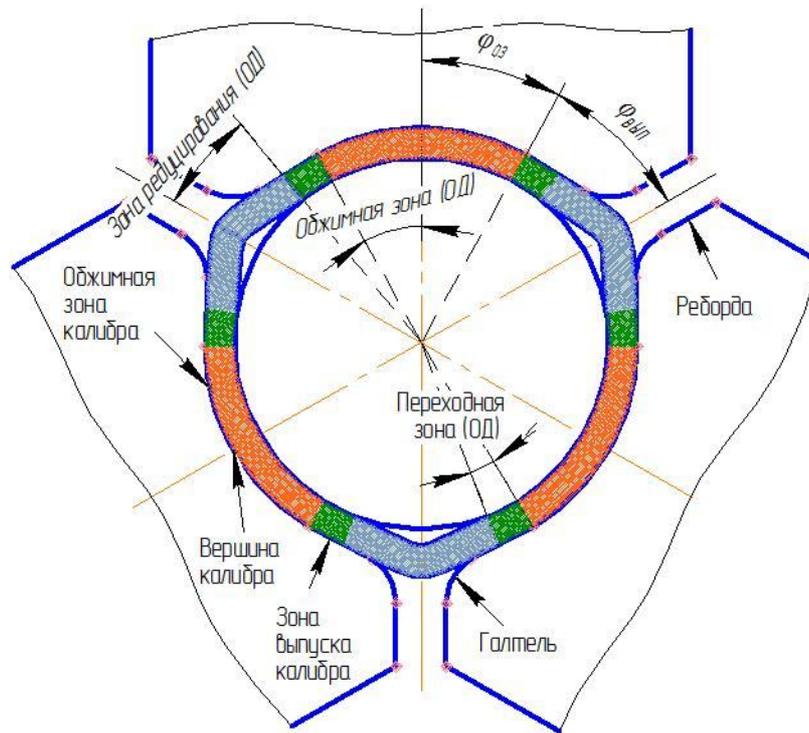


Рисунок 2 – Обозначение:

- участков и зон трехвалкового калибра;
- зон ОД при прокатке раската в трёхвалковом калибре на оправке

Далее приведен предварительный анализ условий работы различных ТПА с двухвалковыми и трёхвалковыми НРС:

- с двухвалковыми клетями: ТПА 30-102 ОАО «ПНТЗ»; ТПА 159-426 АО «ВТЗ»; ТПА-80 ПАО «СинТЗ»; RMM 10 3/4" ТОО «KSP-Steel» г. Павлодар, Казахстан; ТМК-IPSCO г. Эмбридж; ТПА 30-102 ОАО «ЮТЗ».

- с трёхвалковыми клетями: PQF 6 5/8" РУП «БМЗ»; PQF 10 3/4" ПАО «ТАГМЕТ»; ТПА со станом FQM («Danieli», ПАО «СТЗ», г. Северск, Россия).

Распределение относительных обжатий толщины стенки раската по вершине калибра двухвалковых и трёхвалковых НРС при прокатке раската с максимальным значением параметра D/S за НРС по данным ОАО «РосНИТИ» и работы [13] представлено на рисунке 3.

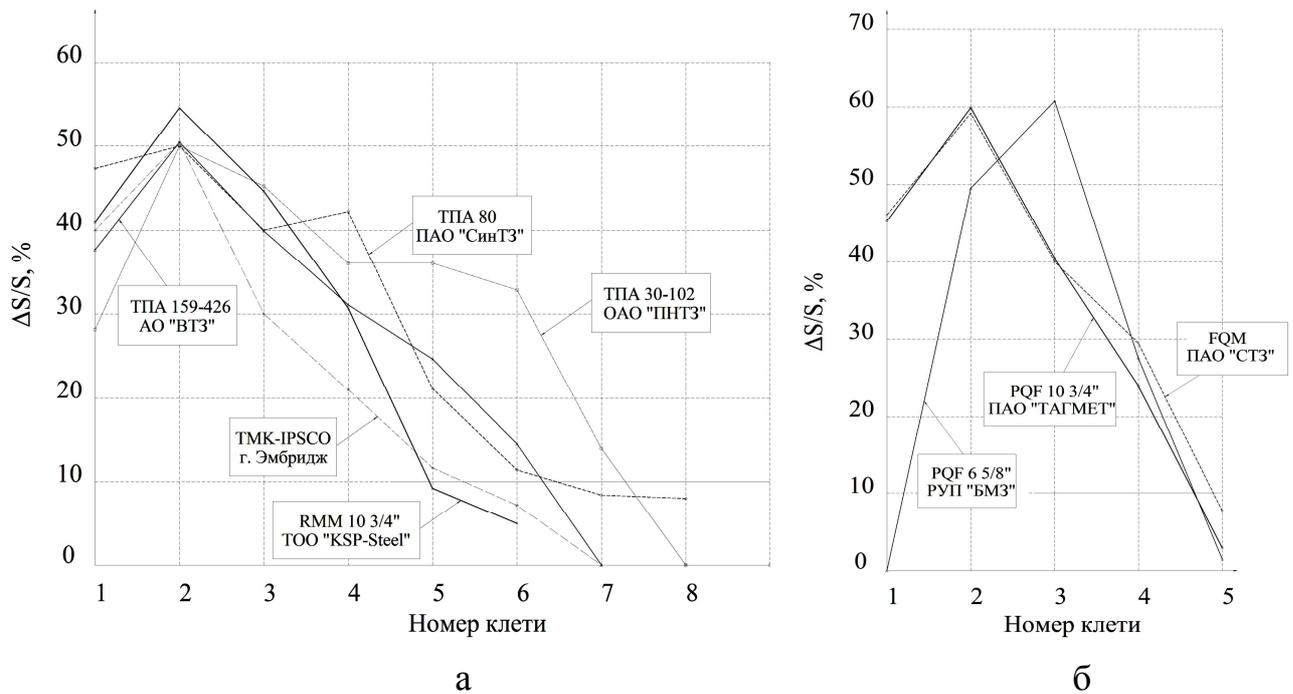


Рисунок 3 – Распределение относительных обжатий толщины стенки раската по вершине калибра при прокатке с максимальным значением параметра D/S за НРС:

а – двухвалкового типа; б – трёхвалкового типа

Для всех рассмотренных режимов обжатий двухвалковых НРС основная деформация по толщине стенки раската по вершине калибра осуществляется в первых двух клетях и составляет для первой клетки $28 \div 48\%$, для второй - $50 \div 55\%$. В последних двух чистовых клетях она находится в диапазоне $0-15\%$. Также для всех НРС характерен ниспадающий режим обжатий.

На стане PQF 6 5/8" РУП «БМЗ» деформация гильзы в первой клетке осуществляется только по наружному диаметру. На станах PQF, FQM относительные обжатия толщины стенки раската распределяются следующим образом: клеть №1 - $46 \div 47\%$; клеть №2 - 60% ; клеть №3 - 40% ; клеть №4 - $24 \div 29\%$; клеть №5 - $2 \div 7\%$. Вследствие меньшего количества клеток у трёхвалковых НРС в клетке №2 и в чистовой клетке №4 параметр $\Delta S/S$ выше, чем у двухвалковых НРС (клетка №2 и предпоследняя чистовая клетка). По сведениям поставщиков оборудования наличие меньшего количества рабочих клеток у трёхвалковых НРС в сравнении с двухвалковыми НРС является одним из основных преимуществ новых агрегатов.

Специалистами ОАО «ЭЗТМ» [14, 15] был проведён сравнительный анализ непрерывной прокатки труб на оправке с применением двух- и трехвалковых калибров с использованием методов компьютерного моделирования при одинаково заданных технологических параметрах процесса прокатки. Результаты анализа показали, что каждый тип НРС теоретически имеет одинаковые показатели по точности труб и при одинаковых условиях процесса технология с применением трёхвалкового НРС является более затратной. Также по данным работ [14, 15] в трёхвалковых клетях обжатие ограничено конструктивными параметрами, однако, влияние калибровки валков НРС на неравномерность деформации и точность прокатываемых труб не отражено.

В таблице 1 представлены коэффициенты вытяжки, параметры $\Delta S/S$ и V_i/H_i для станов PQF (ПАО «ТАГМЕТ») и FQM (ПАО «СТЗ») при прокатке раската с толщиной стенки 6,7 мм за НРС с использованием СК 290 мм и 291 мм соответственно.

Таблица 1 – Параметры прокатки труб на станах PQF и FQM с использованием систем калибров 290 и 291 мм соответственно

Номер клетки	1	2	3	4	5
Коэффициент вытяжки					
FQM	1,517	1,369	1,286	1,150	1,027
PQF	1,501	1,402	1,260	1,136	1,012
$\Delta S/S, \%$					
FQM	45,0	55,0	37,0	27,0	7,0
PQF	43,3	56,8	38,5	22,1	3,4
V_i/H_i					
FQM	1,1115	1,1045	1,0970	1,0865	1,0865
PQF	1,1110	1,1080	1,1120	1,0870	1,0870

При прокатке тонкостенного сортамента на станах PQF и FQM коэффициенты вытяжки и параметры $\Delta S/S$, V_i/H_i приблизительно совпадают за исключением параметра V_i/H_i для клетки №3.

В теории и практике производства бесшовных труб на ТПА с НРС известен ряд методик расчёта режимов процесса прокатки [9, 50-54], которые могут быть адаптированы к промышленным условиям с учётом соответствующих корректировок: расчёт параметров прокатки с учётом регулировки валков,

уточнение различных коэффициентов и прочие. Однако по настоящее время на станах PQF и FQM используются ММ для расчёта параметров процесса прокатки, разработанные поставщиками оборудования. При этом ММ для расчёта режимов прокатки («FQM MOD», «Program PQF_3R») не поддаются полноценному анализу, так как включают в себя большое количество коэффициентов для расчёта катающих диаметров валков в зависимости от прокатываемого сортамента, полученных поставщиками оборудования эмпирическим путём при освоении станов подобного типа в Китае, Индии, Бразилии, Белоруссии, Саудовской Аравии, причём для каждого ТПА эти коэффициенты имеют разную величину.

В то же время следует отметить, что расчёт величины скорости раската на выходе из *i*-ой клетки станов PQF, FQM ведётся против хода прокатки, существенно зависит от расчётных значений коэффициентов вытяжки по клетям и основан на законе постоянства секундных объёмов [40, 42]. Корректировка расчётных параметров процесса прокатки по клетям НРС осуществляется вальцовщиком в достаточно узком диапазоне: до 3% от расчётных величин (обороты валков, высота калибров). Настройка станов осуществляется на основании диаграмм усилий на валки по клетям, отображаемых на дисплее пульта управления.

На настоящее время поставщику оборудования не удалось обеспечить в течение всей прокатной кампании валков НРС, указанную в контрактах, относительную разнотолщинность стенки на готовых трубах (PQF: $\pm 6\%$, FQM: $\pm 5\%$ от номинальной). Также не проведены исследования формоизменения геометрических параметров раската по горячему переделу на ТПА с трёхвалковыми НРС на основе статистических данных, которые необходимы для осуществления полноценного анализа технологии инофирм [86].

Таким образом, в литературных источниках, указаны различные точки зрения, касающиеся технологии прокатки труб с использованием трёхвалковых НРС, а настройка станов осуществляется по математическим моделям, разработанным поставщиками оборудования. Проведение более детального

исследования особенностей процесса прокатки труб с использованием трёхвалковых НРС, позволит выявить рациональные пути совершенствования технологии.

1.2 Исследование параметров формоизменения раската при прокатке в калибрах на оправке

С целью повышения эффективности производства бесшовных труб на ТПА с НРС теоретически и экспериментально исследуются и решаются следующие основные задачи теории непрерывной прокатки [56, 57]:

1. Разработка теории расчёта усилий, действующих на валки при прокатке. При их правильном определении представляется возможным изготавливать надёжные станы с минимальными затратами средств, а в условиях эксплуатации достигать высокой производительности ТПА 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. Правильный расчёт коэффициентов вытяжки и геометрических параметров раската, как в очагах деформации по клетям НРС, так и для всех станов ТПА по горячему переделу, имеет большое значение при разработке прокатного инструмента и позволяет прокатывать трубы с необходимой точностью, высоким качеством поверхности и уменьшить количество аварийных ситуаций в процессе производства.

3. Разработка вопросов динамики процесса прокатки. Основной задачей направления является исследование взаимодействия металла и инструмента. Исследование динамики позволяет определить такие технологически важные величины, как мощность и момент прокатки, режимы деформации и прочие.

В теории и практике редуцирования труб с использованием двухвалковых и трёхвалковых калибров [58, 59] исследованы такие параметры прокатки, как: уширение раската, утонение и утолщение толщины стенки раската по периметру

ОД, потеря устойчивости раската, расчёт критических обжатий в клетях по наружному диаметру раската и прочие. В имеющейся технологической документации и технической литературе по прокатке труб, с использованием трёхвалковых НРС, на настоящий момент данные параметры не отражены, а для их расчёта требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований и вывод соответствующих закономерностей.

На настоящий момент также остаются малоизученными вопросы износа прокатного инструмента трёхвалковых НРС и влияние точности осевой настройки оборудования на качество труб [61-64, 158].

Исследования Ю.М. Матвеева, Я.Л. Ваткина и И.П. Савкина [65, 66] указывают, что толщина стенки раската в выпуске двухвалкового калибра, как правило, претерпевает изменения. Толщина стенки раската по разьёму валков может, как утолщаться, так и утоняться относительно толщины стенки раската по вершине предыдущего калибра. При прокатке в двухвалковых калибрах установлено, что при коэффициентах вытяжки до 1,1 наблюдается утолщение стенки, а при больших значениях утонение. Утолщение стенки раската по разьёму валков определяется деформацией осадки профиля раската в зоне выпуска, а утонение происходит за счёт влияния больших осевых деформаций в центральной обжимной зоне калибра на периферийный выпуск за счёт целостности сечения раската. Здесь же даны эмпирические зависимости изменения толщины стенки раската по линии разьёма валков и величины заполнения калибра от коэффициента вытяжки.

Относительная величина утонения толщины стенки для двухвалкового калибра с круглой обжимной зоной и выпуском, выполненным по радиусу, в соответствии с источником [66] рассчитывается по формуле:

$$y = (0,12 \cdot 2,718^u - 0,35) \cdot 100, \quad (1)$$

Расчёт величины утонения по формуле (1) имеет высокую сходимость с экспериментальными данными при параметре $\Delta S/S$, лежащем в диапазоне от 10 до 40%. Максимальное утонение толщины стенки раската по выпуску калибра в данном случае обычно составляет от 10 до 15 %.

Результаты экспериментов, приведенные в работе [65], показали, что при прокатке труб с использованием двухвалкового НРС толщина стенки раската в выпуске калибров, исключая первую клеть, утоняется. Получена эмпирическая формула для определения величины утонения толщины стенки при прокатке в калибре с круглой обжимной зоной и выпуском, выполненным по радиусу:

$$y = (0,107 \cdot 2,718^{\mu} - 0,337) \cdot 100. \quad (2)$$

При прокатке с задним натяжением коэффициент вытяжки увеличивается на 5-7% в сравнении с значениями, полученными при свободной прокатке, причём величина утонения стенки для обоих режимов прокатки примерно одинаковая [65]. Приложение заднего подпора (до 30 Мн/м²) приводит к снижению коэффициента вытяжки на 4-6%, при этом толщина стенки в выпуске калибра утолщается на 7-30%, а величина отношения диаметра раската по выпуску к диаметру раската по вершине калибра увеличивается до 15-17%. Характер деформации трубы существенно не изменяется при прокатке с различной величиной скорости оправки [65]. При замедленном движении оправки величина утонения толщины стенки на 5-15% выше, чем при ускоренном её перемещении. Установлено, что при прокатке в первой клетке с коэффициентами вытяжки 1,4-1,5 с уменьшением толщины стенки гильзы величина уширения раската растёт. При прокатке во второй и последующих клетях с ростом толщины стенки уширение увеличивается. Исследования И.П. Савкина также показали, что применение системы калибров НРС с круглой обжимной зоной и выпусками, выполненными по радиусу, и чистовыми калибрами, обеспечивающими образование на выходе из НРС зазора между трубой и оправкой, обеспечивает получение качественных труб лишь при расчётном кинематическом натяжении между клетями, близкими к режиму свободной прокатки. Также установлены верхние и нижние пределы овальности двухвалкового круглого калибра с выпусками по радиусу, которые составляют 1,31÷1,12. Показано, что калибры с меньшей величиной овальности следует применять лишь при прокатке труб тонкостенного сортамента. Установлено, что средняя толщина стенки раската за НРС к заднему концу увеличивается по сравнению с передним концом на величину 0,2-0,4 мм.

Полученные данные были использованы при разработке калибровок валков непрерывного стана 30-102 ОАО «ПНТЗ».

В работах Я.Л. Ваткина, А.А. Шевченко, И.П. Савкина [65, 67] показано следующее:

- при прокатке труб одного сортамента на оправках различного диаметра большее уширение наблюдается в случае использования оправок меньшего диаметра, что в свою очередь приводит к переполнению калибров и образованию дефектов прокатного происхождения различного вида (в данном случае под уширением понимается отношение наружного диаметра раската по выпуску калибра к наружному диаметру раската по вершине калибра в i -ом проходе);

- с увеличением диаметра гильзы, без изменения её толщины стенки, при прокатке на оправке одного и того же диаметра величина уширения увеличивается;

- с увеличением коэффициента вытяжки в калибрах (например: применение оправки меньшего диаметра для гильзы с исходной геометрией) и параметра $\Delta S/S$ величина утонения толщины стенки в выпусках калибров возрастает.

Следует отметить, что на настоящий момент не получены зависимости, описывающие влияние геометрических параметров гильз и оправок на качество готовых труб при прокатке с использованием трёхвалковых НРС. Также не выведены зависимости для расчёта параметров формоизменения раската при прокатке в СК трёхвалкового НРС.

Многочисленными экспериментальными исследованиями [56, 65-69, 72, 76, 78] установлено, что при прокатке на автоматических станах и НРС имеет место неравномерность обжатия диаметра и толщины стенки раската по периметру ОД, что приводит к неравномерной деформации и возникновению напряжений различных знаков: в вершине – сжимающих напряжений, в выпусках растягивающих напряжений. Растягивающие напряжения будут тем больше, чем больше неравномерность деформации по периметру калибра, а существенная неравномерность деформации в свою очередь может приводить к разрывам тела раската в процессе прокатки.

На рисунке 4 представлены исследования Я.Л. Ваткина и А.А. Шевченко по изучению трансформации дефектов поверхности круглой формы, предварительно нанесённых на гильзу, после прокатки в двухвалковых калибрах на плавающей оправке.

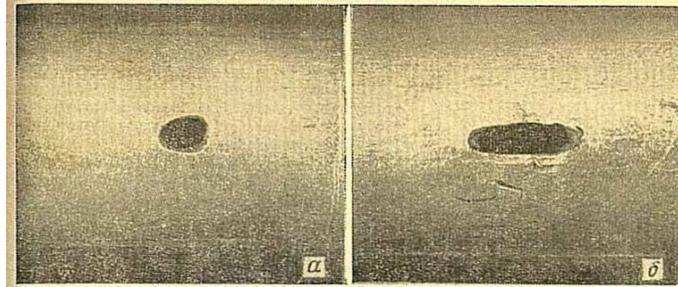


Рисунок 4 - Трансформация дефектов поверхности круглой формы на наружной поверхности раската после прокатки: в вершине (а) и в выпуске калибра (б) [67]

Исследования на стане МРМ [70] по измерению заторможенного раската в непрерывном стане показывают, что возможны случаи неполного заполнения межвалкового пространства калибра, а заполнение калибра металлом зависит от величины межклетевого натяжения и параметра $\Delta S/S$, причём, во всех случаях величина неполного заполнения межвалкового пространства калибра была незначительна.

На рисунке 5 приведены исследования компании «Baо Steel» [71] по изучению зарождения дефектов на внутренней поверхности раската в зоне выпусков двухвалкового калибра вследствие его переполнения при прокатке в НРС на длинной оправке.



а

б

Рисунок 5 - Зарождение дефектов на внутренней поверхности раската в зоне выпусков двухвалкового калибра вследствие его переполнения [71]:

а) – изгиб волокна в зоне выпуска калибра; б) – зарождение дефекта на внутренней поверхности раската в зоне выпуска калибра

Следует также отметить, что большинство исследований, приведенных в параграфах 1.1, 1.2, изначально основывались на аналитических зависимостях, выведенных при расчёте геометрических параметров калибровки валков и геометрических параметров очага деформации.

1.3 Влияние геометрических параметров прокатного инструмента на качество труб

При прокатке на оправке в двухвалковых и трёхвалковых калибрах существуют три основные зоны деформации толщины стенки раската по периметру ОД (рисунок 2):

- 1) зона обжатия толщины стенки по вершине калибра;
- 2) переходная зона, в которой происходит уменьшение параметра $\Delta S/S$;
- 3) зона редуцирования (зона выпуска; неконтактная зона, в которой металл не соприкасается с оправкой).

Границы поперечного сечения очага деформации на выходе из клетки НРС определяются геометрическими параметрами раската (гильзы) на входе в клетку, диаметром оправки, используемой калибровкой валков, режимом обжатий.

На НРС используются несколько основных видов калибров [65-70, 72-85]:

- 1) с круглой или овальной обжимной зоной и выпусками, выполненными по прямой (рисунок 6, а, б);
- 2) с овальной обжимной зоной и выпусками, выполненными по радиусу (рисунок 6, в);
- 3) с круглой обжимной зоной и выпусками, выполненными по радиусу (рисунок 6, г);
- 4) овальные (без выпусков, рисунок 6, д).

Калибры 1-ого вида (рисунок 6, а, б) используют исключительно в первой клетке стана с двухвалковыми калибрами. Эти калибры имеют наибольшую овальность, в сравнении с калибрами, имеющими выпуск по радиусу при одинаковых значениях углов выпуска. Такая форма калибра улучшает условия захвата гильзы валками, которые для первой клетки наименее благоприятные.

Калибры с прямыми выпусками обуславливают наибольшую неравномерность деформации по периметру, что приводит к наибольшей разнотолщинности стенки раската. Поэтому использование выпусков, выполненных по радиусу, предпочтительней в клетях, участвующих в окончательном формировании толщины стенки (предчистовые и чистовые клетки).

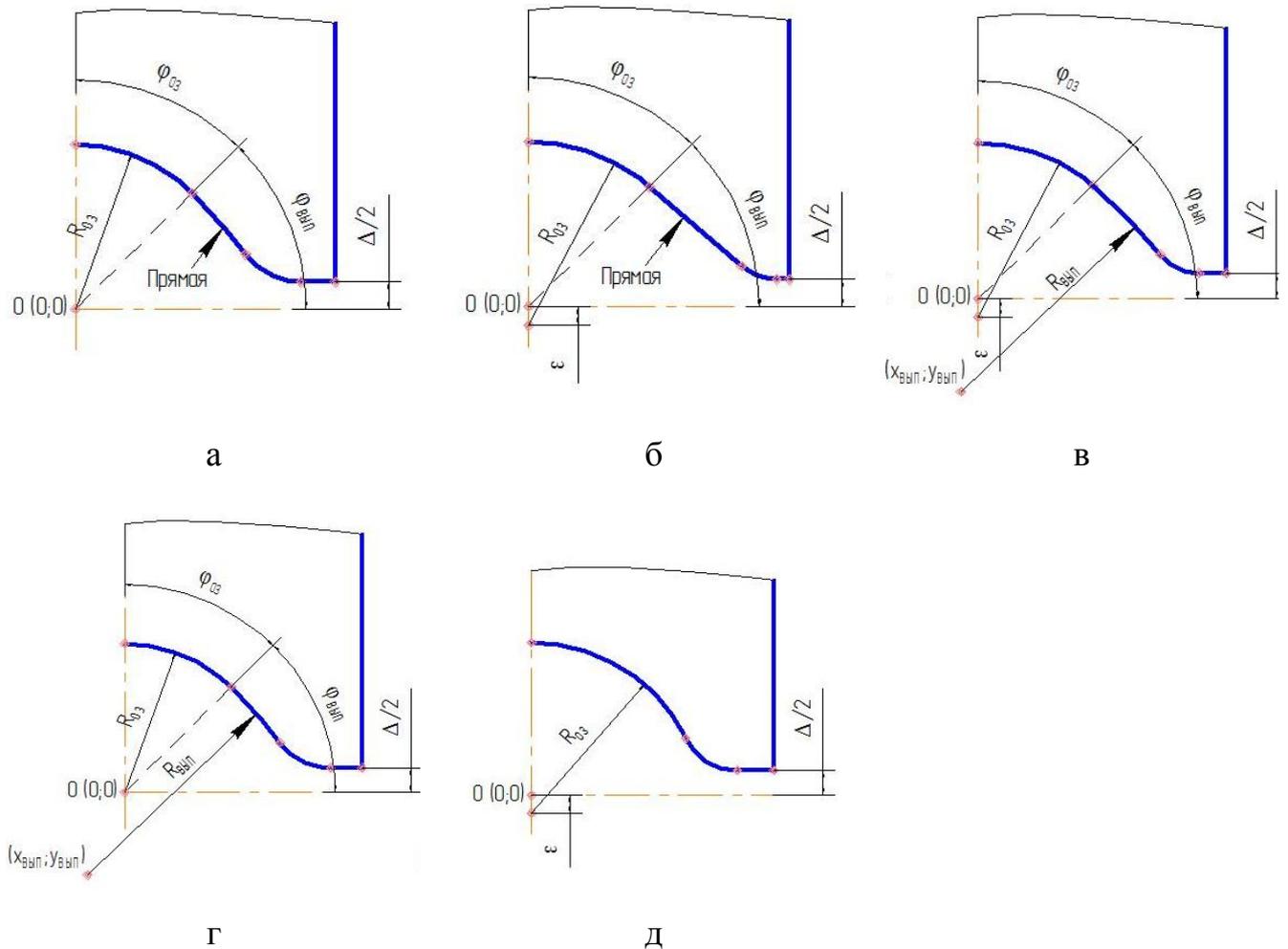


Рисунок 6 – Основные виды калибров непрерывных раскатных станов:

а, б – калибры первого вида; в – калибры второго вида;

г – калибры третьего вида; д – калибры четвёртого вида

Калибры 2-ого вида (рисунок 6, в) используют в черновых и предчистовых обжимных клетях. Их обжимная зона выполнена овальной с целью возможности компенсации величины износа валков в ходе прокатной кампании. По мере износа валков в ходе прокатной кампании, обжимная зона преобразуется из овала в окружность.

Калибры 3-его вида (рисунок 6, г) используются в чистовых клетях. Концентрическое, относительно сечения оправки, расположение обжимной зоны этих калибров обеспечивает получение равномерной толщины стенки по периметру очага деформации. Наибольшая точность по толщине стенки обеспечивается при условии перекрытия относительно друг друга обжимных зон в двух последних чистовых клетях (с целью уменьшения переходной зоны).

Калибры 4-го вида (рисунок 6, д) используют в НРС для обеспечения зазора между раскатом и оправкой в последних клетях с целью уменьшения трения между раскатом и оправкой.

Известно, что основными видами разнотолщинности стенки при прокатке бесшовных труб являются: эксцентricность и гранёность. Эксцентricность образуется в процессе винтовой прокатки и располагается по длине гильз по винтовой линии, а также вследствие существенного смещения оси прокатки станов линии ТПА. Гранёность обусловлена неравномерностью деформации при прокатке труб на оправке с использованием различных видов калибров [86, 87]. На раскате по горячему переделу и готовых трубах наблюдаются оба вида разнотолщинности стенки. На НРС эксцентricная разнотолщинность стенки образуется только в случае отклонения позиционирования инструмента относительно оси прокатки стана (валки, оправка, габбиетты, проводка, ролики рольгангов). Гранёность, также может быть обусловлена следующими факторами: переполнением калибров металлом, износом калибров, применением оправки меньшего диаметра, позиционированием комплекта валков в i -ой клетки под определённым углом (поворот трубы, ассиметричная прокатка).

Конечными расчётными величинами при определении вида разнотолщинности стенки раската по горячему переделу являются: доля эксцентricности и доля гранёности. Преобладание какой-либо из этих долей указывает на узкие места данной технологии и выявляет конкретную операцию из линии ТПА, способствующую образованию одного из перечисленных видов разнотолщинности стенки труб.

Из практики трубного производства известно, что для всех нередуцированных труб, независимо от способа их производства, доля эксцентрисности составляет большую часть в отклонении толщины стенки. Для редуцированных труб резко возрастает доля гранёности, причём тем больше, чем больше степень редуцирования. Гранёность на внутренней поверхности труб проявляется в виде «квадрата» при редуцировании в стане с двухвалковыми клетями или «шестигранника» - при редуцировании в трёхвалковых клетях.

В работе [86] приводятся расчётные экспериментальные данные доли эксцентрисности в поперечной разнотолщинности стенки труб, изготовленных различными способами:

– для ТПА с автоматическим станом доля эксцентрисности на трубах в среднем составляет 55%;

– для ТПА с НРС с плавающей оправкой, в составе которых по 7-9 клеток, эксцентрисность в среднем составляет 26%.

В составе ТПА с автоматическим станом имеется трёхвалковый обкатной стан винтовой прокатки, который выравнивает геометрию внутренней поверхности раската, полученной после автомат стана, поэтому доли гранёности и эксцентрисности здесь соизмеримы.

Проведение сравнительного анализа процессов продольной прокатки труб на оправке с использованием различных видов калибров на основе расчётных данных, имеющих высокую сходимость с промышленными результатами, позволяет определить влияние геометрических параметров калибров на формирование разнотолщинности стенки раската по горячему переделу и на готовых трубах.

Разнотолщинность стенки раската в поперечном сечении очага деформации во многом зависит от формоизменения раската в зоне выпуска калибра i -ой клетки НРС. На этот параметр влияют следующие факторы:

- овальность калибров по клетям стана;
- отношение $l_{\text{од}} / D_{\text{ср}}$;
- распределение параметра $\Delta S/S$ по периметру очага деформации;

- соотношение поперечного профиля раската, входящего в i -ую клетку непрерывного стана, с профилем калибра с учётом изменения зазора между валками;

- величина утолщения и утонения толщины стенки в выпусках калибра.

В работах [65, 69, 80] определены оптимальные овалности двухвалковых калибров шестигранной и овальной формы для узкого сортамента прокатываемых труб, экспериментальные исследования по определению оптимальной овалности трёхвалковых калибров не проводились по настоящее время.

Увеличение параметра $l_{\text{ОД}}/D_{\text{СР}}$ влияет на формоизменение раската следующим образом [67]:

- величина уширения раската возрастает;
- уменьшается угол охвата оправки металлом раската;
- уменьшается коэффициент вытяжки;
- увеличивается площадь контакта раската с оправкой.

Для проведения сравнительного анализа влияния различных калибровок валков на геометрические параметры ОД целесообразно пользоваться аналитическими методиками расчёта геометрических параметров калибровки валков и ОД. Результаты используемых методик должны иметь высокую сходимость с промышленными данными. Математическое описание двухвалковых калибров с круглой или овальной обжимной зоной, с прямыми или радиусными выпусками, и геометрических параметров очага деформации представлены в работах [40, 66, 89, 90]. Методики расчёта шестигранных калибров автомат стана представлены в работах [91-93]. Данные методики расчёта в настоящее время не используются в промышленном производстве вследствие того, что они не учитывают всех возможных соотношений геометрических параметров калибровки валков и ОД, а также не учитывают изменение зазора между валками.

Задачу расчёта геометрических параметров калибровки валков и площади поперечного сечения очага деформации на выходе из i -ой клетки трёхвалкового НРС с учётом сведения и разведения валков в зависимости от прокатываемого

сортамента решали в работах [12, 16]. Следует отметить, что данные расчёты содержат методологические неточности, не учитывают всех возможных соотношений геометрических параметров калибровки валков и ОД, не подкреплены экспериментальными и промышленными исследованиями.

После аналитического описания геометрических параметров калибра и ОД обычно производится анализ напряжённо-деформированного состояния раската в ОД. Прокатка труб на длинной оправке в калибрах с круглой или овальной обжимной зоной, с выпусками, выполненными по радиусу, отличается значительной неравномерностью деформации металла, что необходимо учитывать при разработке рациональных калибровок валков [67, 68, 83]. Величина окружной скорости валка по периметру калибра непостоянна, и как следствие, по периметру раската наблюдаются зоны отставания и опережения. При этом в обжимной зоне калибра смещение металла в продольном направлении максимально [97-99].

В работе Я. Л. Ваткина [99] отмечено:

- чем выше параметр $\Delta S/S$ или коэффициент вытяжки, тем больше величина опережения;

- с увеличением диаметра и толщины стенки раската величина опережения уменьшается.

Исследования, результаты которых опубликованы в работе [100], показали, что чем больше величина абсолютной разнотолщинности стенки раската в черновых и предчистовых калибрах непрерывного раскатного стана, в которых происходит основная деформация металла, тем выше поперечная разнотолщинность стенки раската на выходе из чистовых клетей. Наличие неравномерности деформации также подтверждается экспериментальными и расчётными данными определения давлений металла на валки в различных сечениях по периметру очага деформации при прокатке труб [29, 35, 82-84, 80, 101-104]. Применение многогранных калибров, на основании промышленных и экспериментальных данных [37, 38, 80, 94-96], приводит к снижению энергосиловых параметров и повышению точности толщины стенки раската, в

сравнении с калибрами второго и третьего вида. Стоит отметить, что применение шестигранных калибров в непрерывном раскатном стане не является рациональным решением с точки зрения получения раската высокого качества, так как такая форма калибра может способствовать возникновению различного вида дефектов при прокатке тонкостенного сортамента, в том числе дефекта вида «скворечник». Также из графиков изменения толщины стенки по периметру готовых труб, приведенных в работе [105], можно сделать вывод, что использование шестигранной калибровки способствует увеличению количества наблюдений толщины стенки, стремящихся к номиналу, однако абсолютная разнотолщинность стенки соизмерима с точностью раската, прокатанном с использованием СК с калибрами второго и третьего вида.

Калибр с числом граней больше шести, который, по сути, близок по форме к кругу, может привести к переполнению межвалкового пространства, повышению нагрузок на двигатель и значительному охвату металлом оправки, что также негативно скажется на качестве труб и интенсифицирует износ инструмента.

Проведенные измерения износа инструмента автоматического стана [35] с круглой и шестигранной калибровкой валков, работавших при одинаковых условиях, показали, что эпюры износа качественно совпадают с эпюрами контактных напряжений, причём износ инструмента более интенсивен в зонах с повышенным обжатием толщины стенки раската.

На относительную разнотолщинность стенки раската также значительное влияние оказывает отношение угла обжимной зоны калибра к углу в зоне выпуска. В работе [106] установлено, что применение калибров третьего вида во всех клетях НРС способствует повышению точности раската в сравнении с калибрами четвертого вида, однако, данные по количеству дефектов на готовых трубах в работе [106] не приведены.

Снижение неравномерности деформации также возможно не только путём изменения калибровки валков, но и за счёт использования оправки многогранной либо овальной формы [107]. Для трубопрокатного агрегата с автоматстаном, в

составе которого имеется раскатной стан, оптимальное число граней оправки – шесть [108, 109]. Применение длинной многогранной оправки на НРС является трудновыполнимой задачей [110-114]. Изготовление такой оправки потребует существенных затрат, возникнет сложность в её точном позиционировании, а при прокатке в системе калибров грани оправки будут ориентированы как по выпускам калибра i -ой клетки, так и по вершине калибра $(i+1)$ – ой клетки, что приведёт к повышению относительной разнотолщинности стенки раската, снижению точности внутреннего диаметра и возникновению различного вида дефектов. Наиболее перспективным направлением уменьшения неравномерности деформации в калибрах НРС за счёт оправок является рациональный выбор их диаметров. Обоснованный подход к определению типоразмеров оправок показал свою целесообразность на непрерывном стане 30-102 ЮТЗ [115, 116].

1.4 Уровень изученности процесса прокатки труб в калибрах на оправке на основании патентных исследований

С целью определения рациональных путей совершенствования технологии прокатки труб на ТПА с трёхвалковым НРС был проведён патентный поиск по направлению: «Калибровка валков и система калибров станов продольной прокатки бесшовных труб».

Исследования были проведены по информационным массивам документов на изобретения и полезные модели РФ и зарубежных стран. Было проанализировано 144 документа, выявлено 15 документов, применимых к технологии PQF, FQM [131, 135-148].

Более половины изобретений и полезных моделей зарубежных стран направлены на уменьшение относительной разнотолщинности стенки и улучшение качества поверхности готовых труб за счёт:

- использования многовалковых калибров;
- использования двухвалковых калибров в черновых и предчистовых клетях в совокупности с многовалковыми калибрами в чистовых клетях НРС;

- использования асимметричной калибровки валков либо изменения компоновки привода с целью обеспечения перераспределения деформаций по периметру калибра (различный угол наклона линий симметрии калибра относительно горизонта);

- использования приводных и неприводных клеток в различной компоновке.

Таким образом, изобретательская деятельность зарубежных стран направлена в основном на разработку новых ТПА с НРС. Следует отметить, что практически все разработки не подтверждены экспериментальными и промышленными исследованиями, за исключением технологий PQF и FQM.

В работах [135, 136] предлагается смещение линии разъёма валков в клетки на различную величину относительно горизонтальной линии симметрии калибра, в результате чего обеспечивается перераспределение деформаций по клетям НРС и уменьшаются растягивающие напряжения в теле раската по выпуску калибра. Данное техническое решение недостаточно проработано и не опробовано на практике, а для апробации данного технического решения в условиях существующего производства на ТПА с трёхвалковыми НРС требуются значительные денежные средства.

Технические решения, приведенные в патентах на изобретения РФ, в основном посвящены разработке новых калибровок валков.

На основании проведённого исследования было выявлено, что предлагаемые авторами новые калибровки валков НРС для черновых клеток можно разделить на две группы:

- калибровка валков, в которой форма калибра очерчивается прямыми линиями и многочисленными радиусами обжимной зоны и зоны выпуска [137-140];

- калибровка валков, обеспечивающая уменьшение относительного обжатия толщины стенки раската по вершине калибра [138-146].

В процессе выполнения настоящей работы были проанализированы все предлагаемые варианты калибровок валков, приведенных в работах [137-146]. Каждое из технических решений не применяется на практике и имеет недостатки

с учётом специфики технологии прокатки с использованием трёхвалковых НРС. В работах [137-146], поставленные задачи решались отдельным рассмотрением геометрических параметров калибровки валков, однако задача не была рассмотрена с учётом: расчёта геометрических параметров очага деформации, распределения коэффициентов вытяжки по клетям стана, имеющихся современных средств компьютерного моделирования для расчёта параметров прокатки и сопоставления результатов расчёта с промышленными данными в комплексе.

В работах [147, 148] показана целесообразность применения калибровок валков для предчистовых и чистовых калибров, которые должны обеспечить:

- равномерное снижение величины овальности калибров по клетям стана;
- уменьшение угла выпуска калибра по ходу прокатки.

Результаты работ [147, 148] широко применимы на практике производства бесшовных труб и учтены в настоящей работе при проектировании новых систем калибров трёхвалковых НРС.

1.5 Выводы и постановка задач исследования

В работах [14, 15, 51, 52, 96, 117, 139, 146, 151] задачи по совершенствованию технологии продольной прокатки труб на оправке решались: либо отдельным рассмотрением геометрических параметров калибровки валков без учёта особенностей формоизменения раската в очаге деформации, а также без учёта распределения коэффициентов вытяжки по стану, либо с использованием современных средств компьютерного моделирования технологии продольной прокатки (например: Deform, QForm). Однако, задачи по совершенствованию технологии продольной прокатки труб на оправке не были рассмотрены в комплексе: с учётом разработанных методик расчёта, имеющихся современных средств расчёта параметров продольной прокатки и сопоставления результатов расчёта с промышленными данными. Аналогично можно сказать и про исследования, проведённые до 2000 г., так как соответствующие программные продукты для анализа и расчёта параметров процесса продольной прокатки

отсутствовали на данный период. С учётом развития современного уровня техники на настоящий период целесообразно решать задачи по совершенствованию технологии продольной прокатки в комплексе [57, 60], что позволит уменьшить риск возникновения аварийных ситуаций в условиях промышленного производства, увеличить положительный эффект от разработанных внедряемых технических решений.

Целью работы является совершенствование процесса продольной прокатки труб на трёхвалковом непрерывном раскатном стане, основанное на создании и использовании новых научно обоснованных технических решений, обеспечивающих снижение разнотолщинности стенки и количества дефектов поверхности прокатного происхождения на готовых трубах.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие *задачи исследования*:

- провести анализ существующей технологии процесса продольной прокатки труб на ТПА с непрерывным раскатным станом с использованием литературных и промышленных данных;
- разработать математическую модель расчёта параметров процесса продольной прокатки труб, позволяющую проводить научно обоснованный анализ технологии;
- разработать новые научно обоснованные технические решения, обеспечивающие снижение разнотолщинности стенки и количество дефектов поверхности прокатного происхождения на готовых трубах;
- провести в промышленных и лабораторных условиях экспериментальные исследования с целью проверки теоретических результатов работы и разработанных технических решений;
- выполнить промышленное опробование новых технических решений.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ В ТРЁХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ. РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ КАЛИБРОВ ТРЁХВАЛКОВОГО НЕПРЕРЫВНОГО РАСКАТНОГО СТАНА

2.1 Расчёт оборотов валков по клетям стана PQF

В описании к математической модели поставщика оборудования формула для расчёта оборотов валков по клетям стана PQF не приведена. Высокую сходимость с результатами расчёта по «Program PQF_3R» показывает формула:

$$n_i = \frac{60 \cdot \mu_i \cdot V_{i-1}}{\pi \cdot (D_{\text{уд}i} - k_{PQFij} \cdot H_i)}, \quad (3)$$

где k_{PQFij} - эмпирический коэффициент для i -го калибра стана PQF в j -ой клетке, применяемый для расчёта катающих диаметров валков, полученный поставщиком оборудования при освоении станом подобного типа в Китае, Индии, Бразилии, Белоруссии, Саудовской Аравии.

Данная формула выведена на основании известных математических зависимостей:

- закон постоянства секундных объёмов;
- формула для расчёта линейной скорости раската на выходе из клетки;
- формула для расчёта катающего диаметра с использованием коэффициента k_{PQFij} .

Соответственно, с учётом формулы (3), для расчёта оборотов валков по клетям стана PQF с минимальной погрешностью относительно результатов расчёта поставщика оборудования, необходимо с высокой точностью рассчитать величину коэффициента k_{PQFij} и μ_i .

Коэффициент k_{PQFij} принимает одинаковую величину по клетям при прокатке различного сортамента труб с использованием СК стана PQF 190 мм, однако, для каждой системы калибров стана PQF k_{PQFij} также имеет свою величину (таблица 2). Коэффициент k_{PQFij} находится в диапазоне от 0,18 до 1,23.

Таблица 2 – К расчёту оборотов валков по клетям стана PQF

№ клетки	H _i *, мм	D _i *, мм	μ _i *	V _i *, м/с	k _{PQFij}	n _i , об/мин	n _{PQF} *, об/мин
При прокатке раската за станом PQF наружным диаметром 190,16 мм, с толщиной стенки 8,36 мм, с использованием СК 190 мм							
1	198,890	805,790	1,399	2361,609	0,79	69,521	69,60
2	193,170	844,970	1,362	3216,511	0,96	93,144	93,30
3	189,950	794,550	1,231	3959,526	0,94	122,763	122,75
4	189,230	719,230	1,104	4371,316	0,95	154,758	154,53
5	189,230	714,230	1,018	4450,000	1,00	161,883	162,17
При прокатке раската за станом PQF наружным диаметром 190,91 мм, с толщиной стенки 13,39 мм, с использованием СК 190 мм							
1	200,510	852,410	1,280	2168,591	0,79	59,671	59,68
2	194,580	851,380	1,254	2719,414	0,96	78,150	78,23
3	191,020	850,620	1,165	3168,117	0,94	90,166	90,10
4	190,120	740,120	1,075	3405,726	0,95	116,254	116,01
5	190,120	740,120	1,013	3450,000	1,00	119,800	119,97
При прокатке раската за станом PQF наружным диаметром 289,39 мм, с толщиной стенки 7,80 мм, с использованием СК 290 мм							
1	298,08	849,58	1,48	1665,03	0,18	60,15947	60,09
2	292,03	848,43	1,428	2377,663	1,23	92,81879	92,98
3	288,39	848,09	1,274	3029,143	1,22	116,5781	116,24
4	287,81	737,81	1,121	3395,669	1,16	160,5457	160,44
5	287,81	737,81	1,016	3450	1,22	170,3989	170,36
Примечание: * - величина, рассчитанная с использованием «Program PQF_3R»							

В описании к расчёту параметров процесса прокатки, предоставленного «SMS Meer», указано, что коэффициенты вытяжки по клетям стана PQF рассчитываются путём решения систем уравнений, состоящих из полиномиальных уравнений третьей степени. Переменной в этих уравнениях является угловая координата, причём коэффициенты для расчёта этих уравнений определяются на основании расчётных формул геометрических параметров калибровки валков, расчётных величин уширения раската и радиуса, описывающего профиль раската в зоне выпуска калибра, однако, расчётные формулы для осуществления вычислений геометрических параметров очага деформации фирмой «SMS Meer» в описании процесса не приведены.

От точности расчёта геометрических параметров очага деформации во многом зависит качество настройки стана и эффективность разработанной калибровки валков, поэтому целесообразно разработать математическую модель расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке труб в трёхвалковых калибрах, которая позволит провести анализ существующей

технологии, разработать рациональные пути её совершенствования и осуществить безаварийные опытно-промышленные прокатки труб с использованием различных систем калибров трёхвалковых НРС.

2.2 Математическая модель и алгоритм расчёта геометрических параметров очага деформации

Как известно, коэффициент вытяжки в отдельной клетке равен отношению площади поперечного сечения раската на входе в ОД к площади поперечного сечения раската на выходе из ОД. При продольной прокатке труб на оправке форма поперечного сечения раската представляет собой сложную геометрическую фигуру.

Сравнительный анализ методик расчета площади поперечного сечения очага деформации на выходе из i -ой клетки при прокатке труб в трехвалковых калибрах, приведенный в параграфе 1.2 и работе [119] показал, что в результате использования существующих методик расчёта возможна некорректная настройка непрерывного стана, а результаты расчёта не подкреплены экспериментальными и промышленными исследованиями.

В настоящей работе разработана математическая модель расчёта геометрических параметров поперечного сечения очага деформации раската на выходе из i -ой клетки при прокатке в трехвалковых калибрах на оправке и без оправки с учётом изменения зазора между валками, а также выполнена оценка результатов расчёта на основании промышленных данных и результатов 3D моделирования с использованием программы QForm.

До получения экспериментального материала по изменению толщины стенки трубы в зоне выпуска трёхвалковых калибров использовалась условная схема деформирования: без изменения толщины стенки раската по разьёму валков относительно толщины стенки в вершине предыдущего калибра, которая широко используется на практике [40, 66]. В работах [12, 16] также было принято данное допущение, а наружный профиль для $1/6$ части калибра ограничивался только радиусом выпуска R_v (радиус сопряжения R_{CD} отсутствовал). Такая схема

построения для трёхвалкового калибра приводит к перелому или неплавному сопряжению наружного и внутреннего профилей трубы по разьёму валков, что на практике не наблюдается. Кроме того, для определённых соотношений параметров калибра и режимов обжатий в соответствии со схемой, приведенной в работах [12, 16], при построении очага деформации: отсутствует пересечение радиуса оправки с радиусом внутреннего профиля раската $R_{в2}$, что делает расчёт невозможным (например, при прокатке тонкостенного сортамента с использованием чистовых калибров с овальностью меньше 1,05). Также следует отметить, что с учётом изменения зазора между валками, расчёты [12, 16] содержат методическую неточность, что приводит к существенной погрешности при определении геометрических параметров очага деформации.

В работах [40, 66] для двухвалковых калибров предложено сопряжение сечения профиля раската в зоне разьёма валков выполнять по радиусу, который много меньше радиуса выпуска, а его центр расположен на пересечении линии разьёма валков с радиусом оправки. В разработанной ММ использовался такой же подход.

Схема определения геометрических параметров ОД, вследствие его симметричности, рассматривается для 1/6 части калибра или 1/2 периметра ручья валка.

Общая схема для расчёта 1/6 части калибра приведена на рисунке 7 и описывает любой из приведенных в параграфе 1.3 видов калибров:

- при эксцентриситете радиуса обжимной зоны $\varepsilon=0$ или $\varepsilon\neq 0$ и при радиусе выпуска $R_{в}=\infty$ имеем геометрические параметры ОД при прокатке в калибре первого вида;

- при эксцентриситете радиуса центральной зоны $\varepsilon\neq 0$ и $R_{в}\neq\infty$ имеем геометрические параметры ОД при прокатке в калибрах второго вида;

- при $\varepsilon=0$ и $R_{в}\neq\infty$ имеем геометрические параметры ОД при прокатке в калибре третьего вида;

- при $\varepsilon\neq 0$ и $R_{в}=0$ имеем геометрические параметры ОД при прокатке в калибре четвёртого вида.

При расчёте используются уравнения в полярных координатах.

В общем виде площадь поперечного сечения ОД в обжимных клетях определяют по выражению (рисунок 7 а):

$$F_i = 3 \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_{\text{вер}}}^{\frac{\pi}{2}} r_1^2(\varphi) d\varphi + \int_{\varphi_3}^{\frac{\pi}{2}-\varphi_{\text{вер}}} r_3^2(\varphi) d\varphi + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\varphi_3} r_4^2(\varphi) d\varphi - \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}+\varphi_7} r_5^2(\varphi) d\varphi - \int_{\frac{\pi}{6}+\varphi_7}^{\frac{\pi}{2}} r_2^2(\varphi) d\varphi \right], \quad (4)$$

а площадь поперечного сечения ОД при прокатке с обеспечением зазора между раскатом и оправкой (рисунок 14 б) по выражению:

$$F_1 = 3 \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_{\text{вер}}}^{\frac{\pi}{2}} r_1^2(\varphi) d\varphi - \int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_{\text{вер}}}^{\frac{\pi}{2}} r_2^2(\varphi) d\varphi + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}-\varphi_{\text{вер}}} r_3^2(\varphi) d\varphi - \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}-\varphi_{\text{вер}}} r_5^2(\varphi) d\varphi \right], \quad (5)$$

здесь r_j - уравнения в полярных координатах, описывающие наружные и внутренние профили раската, обозначенные участками с номерами $j=1, 2, 3, 4, 5$ (рисунок 7).

Далее приведена последовательность расчётов, в которых определяются пределы интегрирования и вид функций r_j в выражениях (4) и (5).

Толщина стенки раската в вершине i -го калибра рассчитывается по формуле:

$$S_i = R - R_{\text{он}} - (\varepsilon + e). \quad (6)$$

Для 1-ой клетки: $S_{i-1} = S_{\Gamma}$.

Решая систему уравнений (7), находим x_1 :

$$\begin{cases} x_1^2 + (y_1 + \varepsilon)^2 = R^2 \\ y_1 = x_1 \cdot \text{tg}\alpha \end{cases}, \quad (7)$$

где $\alpha = \frac{\pi}{6} + \alpha_s$, тогда

$$x_1 = \frac{-\varepsilon \cdot \text{tg}\alpha + \sqrt{\varepsilon^2 \cdot \text{tg}^2\alpha + (R^2 - \varepsilon^2) \cdot (1 + \text{tg}^2\alpha)}}{1 + \text{tg}^2\alpha}.$$

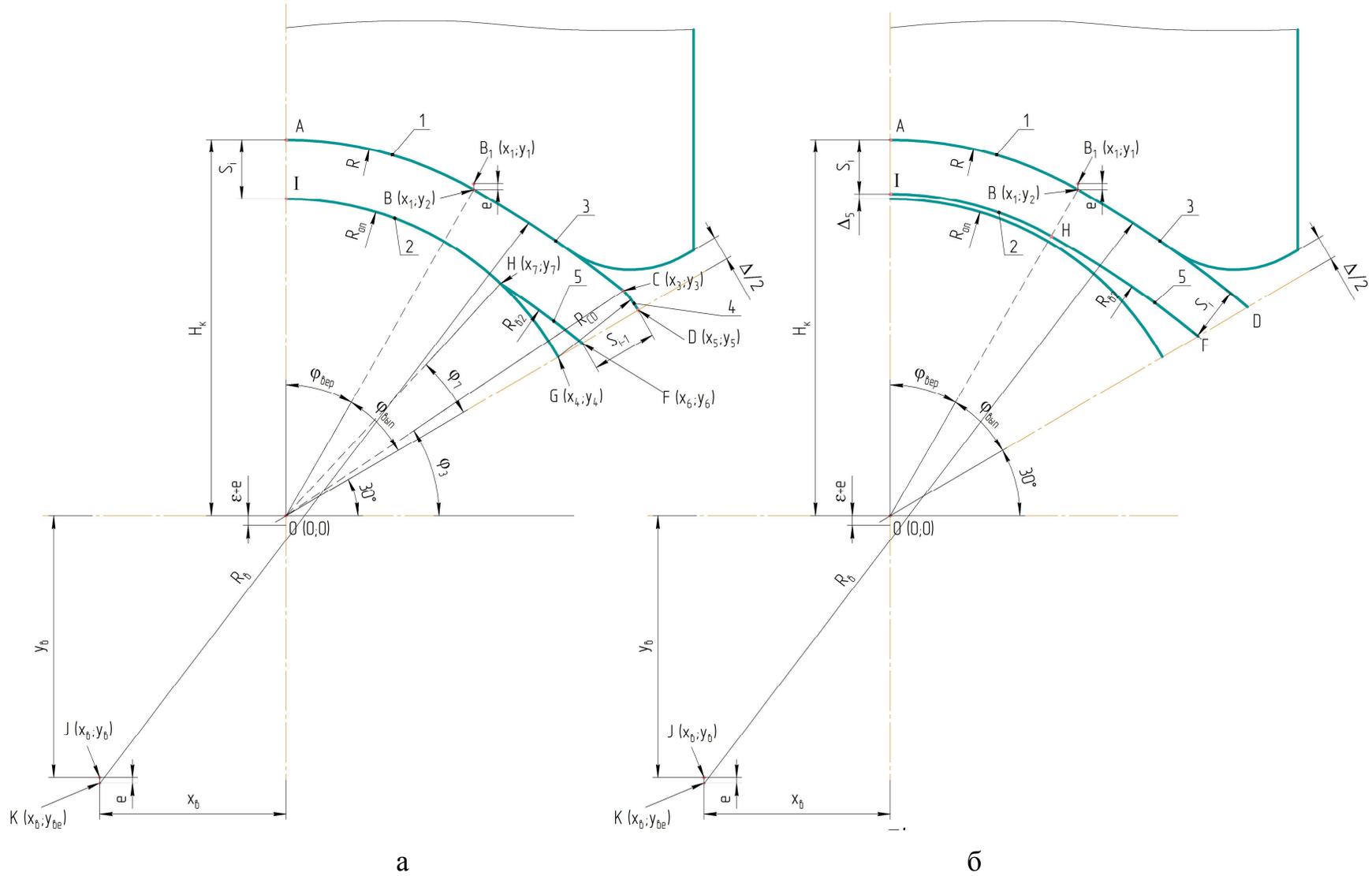


Рисунок 7 – Схема к расчёту геометрических параметров поперечного сечения ОД при прокатке в трёхвалковых калибрах
 а – с обжатием толщины стенки раската; б – с обеспечением зазора между раскатом и оправкой

Получаем координаты точки B_1 и соответственно, с учётом свода или развода валков определяются координаты точки B , как:

$$x_2 = x_1, \quad y_2 = y_1 - e.$$

Угол выпуска калибра с учётом свода или развода валков определяем, как:

$$\varphi_{\text{вып}} = \arctg\left(\frac{y_2}{x_1}\right) - \frac{\pi}{6}. \quad (8)$$

Зная угол выпуска с учётом изменения зазора между валками, определим угол обжимной зоны:

$$\varphi_{\text{обж}} = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{y_2}{x_1}\right) \quad (9)$$

Уравнение в полярных координатах для $r_1(\varphi)$ представляется в виде:

$$r_1(\varphi) = r = \sqrt{(\varepsilon + e)^2 \cdot \sin^2 \varphi + [R^2 - (\varepsilon + e)^2]} - (\varepsilon + e) \cdot \sin \varphi, \quad (10)$$

а уравнение контура оправки постоянного радиуса $R_{\text{оп}}$ записывается в виде:

$$r_2(\varphi) = r = R_{\text{оп}} \quad (11)$$

Координаты центра радиуса выпуска с учётом свода или развода валков равны:

$$x_{\text{се}} = x_{\text{с}}; \quad y_{\text{се}} = y_{\text{с}} + e, \quad (12)$$

а величина зазора между валками равна:

$$\Delta = \Delta_{\text{н}} - \sqrt{3} \cdot e. \quad (13)$$

Далее определяем координаты точки C совместным решением уравнения выпуска радиусом $R_{\text{с}}$, очерченным из центра, с координатами согласно (12) и уравнения прямой параллельной оси разъёма валков, смещённой вверх относительно начала координат на величину зазора по формуле (13).

Это решение даёт координаты точки C в следующем виде:

$$y_3 = \frac{1}{8} \cdot \left[\sqrt{[2 \cdot \sqrt{3} \cdot (x_{\text{с}} - \Delta) + 2 \cdot y_{\text{се}}]^2 + 16 \cdot [R_{\text{с}}^2 - y_{\text{се}}^2 - (x_{\text{с}} - \Delta)^2]} - (2 \cdot \sqrt{3} \cdot (x_{\text{с}} - \Delta) + 2 \cdot y_{\text{се}}) \right],$$

$$x_3 = \sqrt{3} \cdot y_3 - \Delta,$$

Угол φ_3 определяется, как:

$$\varphi_3 = \operatorname{arctg} \left(\frac{y_3}{x_3} \right). \quad (14)$$

Уравнение в полярных координатах $r_3(\varphi)$ представляется в виде:

$$r_3(\varphi_3) = r = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2 \cdot x_{ee} \cdot \cos \varphi + 2 \cdot y_{ee} \cdot \sin \varphi)^2 + 4 \cdot (R_{ee}^2 - x_{ee}^2 - y_{ee}^2)} - (2 \cdot x_{ee} \cdot \cos \varphi + 2 \cdot y_{ee} \cdot \sin \varphi) \right]. \quad (15)$$

Координаты точки G:

$$y_4 = \frac{R_{on}}{2}; \quad x_4 = \frac{\sqrt{3} \cdot R_{on}}{2}, \quad (16)$$

радиус сопряжения по разъёму калибра рассчитывается как

$$R_{CD} = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2}, \quad (17)$$

уравнение в полярных координатах представляется в виде:

$$r_4(\varphi) = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2 \cdot \cos \varphi \cdot x_4 + 2 \cdot \sin \varphi \cdot y_4)^2 + 4 \cdot (R_{CD}^2 - x_4^2 - y_4^2)} + (2 \cdot \cos \varphi \cdot x_4 + 2 \cdot \sin \varphi \cdot y_4) \right]. \quad (18)$$

Затем определяем координаты точки D:

$$y_5 = \frac{(R_{on} + R_{CD})}{2}; \quad x_5 = \sqrt{3} \cdot y_5,$$

и координаты точки F:

$$y_6 = y_5 - \frac{S_{i-1}}{2}; \quad x_6 = x_5 - S_{i-1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Зная координаты точки F, радиус дуги неконтактной зоны (дуга HF) на внутреннем профиле раската определится, как

$$R_{e2} = \sqrt{(x_6 + x_e)^2 + (y_6 + y_{ee})^2}. \quad (19)$$

Координаты точки H определяются из совместного решения уравнения контура оправки и кривой внутреннего контура неконтактной зоны:

$$y_7 = \frac{-2 \cdot a \cdot b - \sqrt{4 \cdot a^2 \cdot b^2 + 4 \cdot (1 + a^2) \cdot (R_{on}^2 - b^2)}}{2 \cdot (1 + a^2)}, \quad x_7 = \sqrt{R_{on}^2 - y_7^2},$$

$$\text{где } a = -\frac{y_{ee}}{x_e}, \quad b = -\frac{(x_e^2 + y_{ee}^2 + R_{on}^2 - R_{e2}^2)}{2 \cdot x_e}.$$

По известным координатам точки Н $(x_7; y_7)$ определяется угол φ_7 :

$$\varphi_7 = \operatorname{arctg} \left(\frac{y_7}{x_7} \right) - \frac{\pi}{6}. \quad (20)$$

Уравнение в полярных координатах $r_5(\varphi)$ записывается в виде:

$$r_5(\varphi) = r = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2 \cdot \cos \varphi \cdot x_6 + 2 \cdot \sin \varphi \cdot y_{6e})^2 + 4 \cdot (R_{e2}^2 - x_6^2 - y_{6e}^2)} - (2 \cdot \cos \varphi \cdot x_6 + 2 \cdot \sin \varphi \cdot y_{6e}) \right] \quad (21)$$

Подставляя в (4) выражение для функций $r_1(\varphi)$ по (10), $r_2(\varphi)$ по (11), $r_3(\varphi)$ по (15), $r_4(\varphi)$ по (18), $r_5(\varphi)$ по (21) с учётом значений углов $\varphi_{веп}$ по (9), φ_3 по (14) и φ_7 по (20) в пределах интегрирования получим площадь поперечного сечения в обжимных трёхвалковых калибрах.

Для расчёта геометрических параметров ОД при прокатке без оправки (рисунок 7, б) величина свода или развода валков рассчитывается по формуле:

$$e = R - S_i - \Delta_5 - R_{on} - \varepsilon, \quad (22)$$

а толщина стенки в вершине калибра принимается равной толщине стенки по разьёму валков предыдущей клетки

$$S_i = S_{i-1}.$$

Уравнения в полярных координатах участков 1 и 3 (рисунок 7 б) аналогичны уравнениям в полярных координатах $r_1(\varphi)$ и $r_3(\varphi)$ для обжимных калибров (рисунок 7 а) по (10) и (15), а уравнения участков 2 и 5 (рисунок 7 б) отличаются тем, что значение радиуса для $r_2(\varphi)$ в выражении (11) принимает значение $R - S_{i-1}$, а для $r_5(\varphi)$ в выражении (21) значение $R_e - S_{i-1}$.

Для расчёта геометрических параметров ОД трёхвалкового калибра при прокатке с обеспечением зазора между раскатом и оправкой под знаком интеграла принимают функции $r_1(\varphi)$ по (10), $r_2(\varphi)$ по (11), $r_3(\varphi)$ по (15), $r_5(\varphi)$ по (21), которые подставляют в выражение (5).

При известных величинах утонения и утолщения стенки по выпуску калибра (обратная задача) и угле окова оправки (φ_7), полученных, например, экспериментальным путём, либо с использованием программ Deform, QForm,

геометрические параметры ОД можно описать зависимостями, приведенными ниже.

Координаты точки Н:

$$x_7 = \frac{R_{on}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_7)}}; \quad y_7 = x_7 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_7).$$

Координаты точки F находятся, путём решения системы уравнений пересечения окружности радиусом R_{B2} с центром $(x_B; y_{Be})$ и прямой OF:

$$x_6 = \frac{\sqrt{\left(x_e + \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot y_{ee}\right)^2 + \left(1 + \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{6}\right)^2\right) \cdot (R_{e2}^2 - x_e^2 - y_{ee}^2)} - \left(x_e + \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot y_{ee}\right)}{1 + \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{6}\right)^2},$$

$$\text{где } R_{e2} = \sqrt{(x_7 + x_e)^2 + (y_7 + y_{ee})^2};$$

$$y_6 = x_6 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{6}\right).$$

Толщина стенки в выпуске с учётом утонения:

$$S_{i-1} = K_y \cdot 2 \cdot (y_5 - y_6),$$

где K_y - коэффициент, учитывающий утонение толщины стенки в выпуске калибра, полученный экспериментальным путём или с использованием средств компьютерного моделирования.

Выведенные зависимости также можно использовать для расчёта параметров процесса прокатки на двухвалковом НРС, при соответствующем изменении пределов интегрирования и учёте угла профиля валка, который равен: 120° для трёхвалкового калибра, 180° для двухвалкового калибра.

Также получены формулы для расчёта ширины двухвалкового и трёхвалкового калибров.

Формула для расчёта ширины двухвалкового калибра:

$$B_2 = \sqrt{R_e^2 - y_{ee}^2} - x_e \quad (23).$$

Формула для расчёта ширины трёхвалкового калибра:

$$B_3 = \sqrt{\frac{3}{4} \cdot \left(x_e + \frac{y_{ee}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (R_e^2 - x_e^2 - y_{ee}^2)} - \frac{\sqrt{3}}{2} \left(x_e + \frac{y_{ee}}{\sqrt{3}}\right) \quad (24).$$

С использованием зависимости (20) площадь контактной поверхности раската с оправкой можно определить по формуле:

$$F_{OK} = 2 \cdot \pi \cdot R_{on} \cdot L_{MKЛ} \cdot \left(1 - \frac{\varphi_7}{60}\right).$$

На основе выведенных зависимостей в среде «Mathcad 14» была разработана программа расчёта геометрических параметров ОД, алгоритм которой представлен на рисунке 8. На рисунке 8 с индексом «3» обозначены параметры, которые используются при расчёте в случае прокатки с обеспечением зазора между раскатом и оправкой, либо в случае прокатки без оправки.

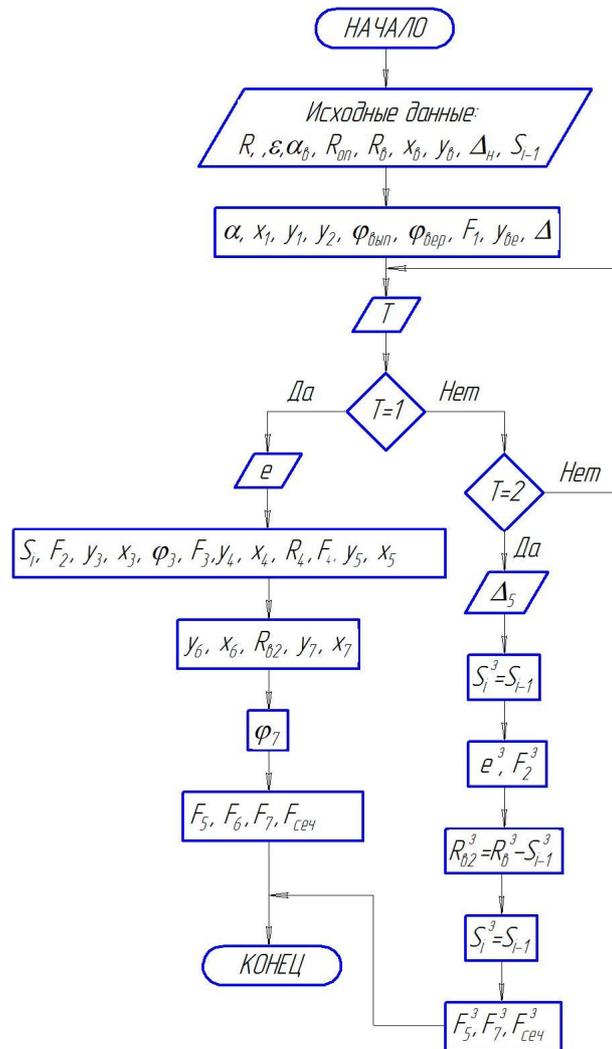


Рисунок 8 – Алгоритм расчёта площади поперечного сечения ОД на выходе из *i*-ой клетки трёхвалкового стана

2.3 Численная оценка зависимостей для расчёта параметров процесса прокатки в трёхвалковых калибрах

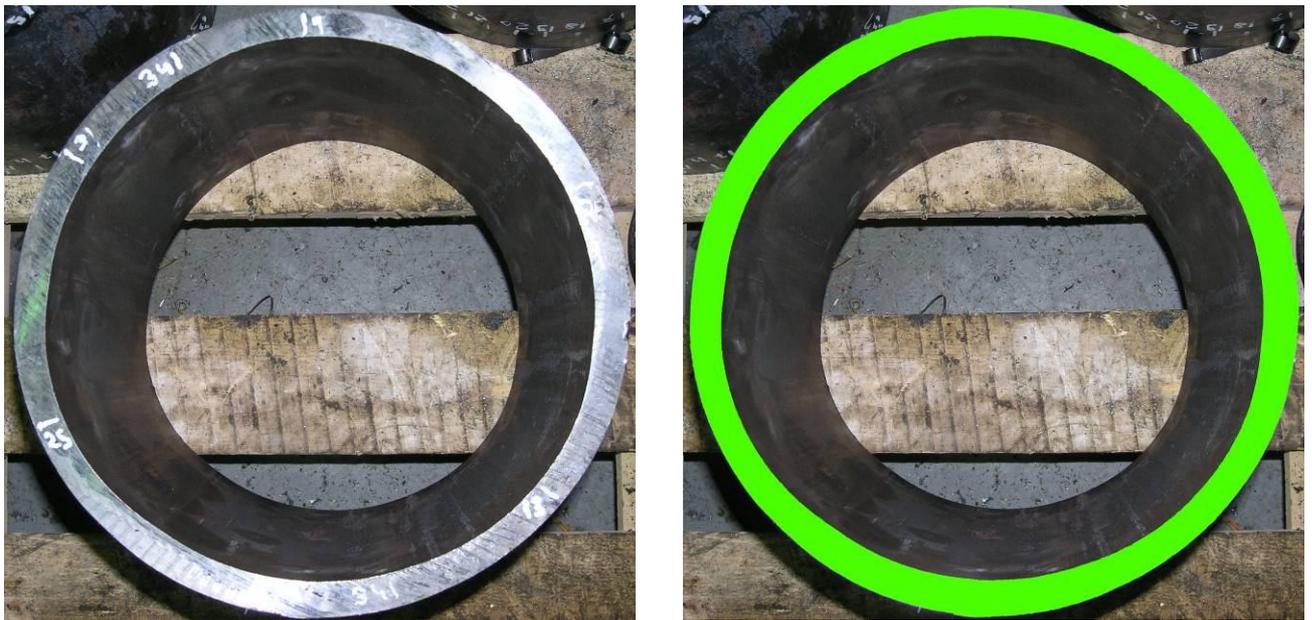
Точность определения геометрических параметров ОД оценивали в системе автоматизированного проектирования «КОМПАС». При этом в системах автоматизированного проектирования строились поперечные сечения ОД для различных видов калибров с учётом изменения зазора между валками. При сравнении расчётов с данными программы «КОМПАС» разницы в результатах не наблюдалось.

С помощью метода, описанного в работе [127], выполнена оценка работоспособности разработанной ММ. В основе метода лежит получение растрового изображения высокой чёткости (цифровая фотография) и последующая его обработка на компьютере с использованием графического редактора «Paint.NET».

В данном методе на отснятой фотографии каждый пиксель (наименьший логический элемент изображения) рассматривается как единица измерения, при помощи которой с высокой точностью можно определить площадь фигуры любой сложности. Последовательность операций для определения площади фигур в программе «Paint.NET» выглядит следующим образом. В программе открывается отснятая фотография, на которой, в местах с заранее известными размерами (сечения, в которых была измерена толщина стенки по периметру поперечного сечения ОД на выходе из *i*-ой клетки стана), строятся отрезки, отличающиеся от основных цветов изображения. Длины отрезков в программе измеряются в пикселях. После построения отрезков, при наведении курсора на участки, принадлежащие отрезкам, на экране монитора отображаются координаты, при помощи которых определяются длины данных отрезков в пикселях. Затем рассчитывается количество пикселей, приходящихся на миллиметр длины:

$$C = \frac{S_{\text{ф. pix}}}{S_{\text{ф. мм}}}.$$

Зная это соотношение, определяется количество квадратных пикселей в квадратном миллиметре. После этого на фотографии область очага деформации закрашивается оттенком цвета (рисунок 9), отличающегося от основных цветов изображения, и, применив операцию для расчёта площади закрашенного участка, на экране монитора отображается значение площади в квадратных пикселях, которое переводится в мм^2 . Сравнение результатов, полученных с помощью графического метода, с расчётами по разработанной ММ представлены в таблице 3.



а) – Фотография очага деформации на выходе из 3-ей клетки стана PQF

б) – Закрашенная область очага деформации на выходе из 3-ей клетки стана PQF в графическом редакторе «Paint.NET»

Рисунок 9 – Графический метод определения площади поперечного сечения очага деформации

При сравнении не учитывались: жёсткость клеток, температурный коэффициент расширения металла. Погрешность при расчёте находилась в пределах 1,38-4,05%, причём площадь, рассчитанная по разработанной ММ отличалась от фактической в большую сторону. Если учесть температурный коэффициент расширения металла, то разница расчётных значений с фактической геометрией раската была бы ещё меньше. При расчете коэффициентов вытяжки по клетям стана погрешность не превышала 2,79 %.

Таблица 3 - Сравнение результатов расчёта ММ с результатами, полученными с использованием графического метода

№ клетки	№ точки	Толщина стенки, мм	(X1;Y1), (X2;Y2)				Фактическая толщина стенки в пикселях (pix)	количество пикселей в мм	среднее количество пикселей в мм	pix ² в мм ²	F _{pix} , pix ²	F _ф , мм ²	F _п , мм ²	П _ф , %	F _{гф}	μ _ф	μ _п	П _μ , %
			X1	Y1	X2	Y2												
1	0	22,27	1278	73	1278	218	145,00	6,51	6,278	39,418	773400	19620,66	20150,04	2,63	23320	1,189	1,157	2,63
	6	25,01	1987	563	2144	511	165,39	6,61										
	12	22,32	1898	1386	2029	1454	147,60	6,61										
	18	25,02	1266	1753	1265	1906	153,00	6,12										
	24	22,63	629	1291	515	1362	134,30	5,93										
	30	25,42	461	506	598	566	149,56	5,88										
2	0	18,2	1138	91	1142	201	110,07	6,05	6,189	38,303	641297	16742,74	17450,22	4,05	23320	1,172	1,155	1,47
	6	20,66	1895	410	1796	485	124,20	6,01										
	12	17,9	1983	1132	2091	1156	110,63	6,18										
	18	20,51	1432	1747	1475	1873	133,13	6,49										
	24	17,8	524	1433	427	1490	112,50	6,32										
	30	20,83	340	671	456	722	126,70	6,08										
3	0	13,37	1206	86	1206	176	90,00	6,73	6,774	45,887	542255	11817,13	11981,88	1,38	23320	1,417	1,456	-2,79
	6	15,93	1994	645	2090	600	106,02	6,66										
	12	13,69	1908	1525	1982	1583	94,02	6,87										
	18	16,01	1215	1820	1215	1934	114,00	7,12										
	24	13,5	406	1359	493	1326	93,05	6,89										
	30	16,06	489	514	576	568	102,40	6,38										
4	0	10,8	1259	85	1261	154	70,00	6,39	6,464	41,783	436277	10441,42	10674,78	2,19	23320	1,132	1,122	0,82
	6	13,26	1935	490	2001	442	84,81	6,15										
	12	11,54	1994	1334	2064	1367	77,83	6,71										
	18	13,14	1329	1769	1337	1857	88,00	6,73										
	24	10,89	564	1352	501	1383	72,45	6,45										
	30	13,58	494	533	570	574	87,32	6,36										
5	0	11,62	1155	1780	1148	1853	73,33	6,31	6,325	40,007	375635	9389,19	9746,22	3,66	23320	1,112	1,095	1,51
	6	10,46	435	1330	497	1301	68,44	6,54										
	12	11,39	590	435	642	481	69,42	6,09										
	18	10,77	1346	224	1357	158	66,91	6,21										
	24	11,81	1908	619	1973	584	73,82	6,25										
	30	10,65	1872	1442	1931	1479	69,64	6,54										

Поставщик оборудования «SMS Meer» для аналогичных расчётов использует программу «Program PQF_3R», которая передана заводу-изготовителю и используется для расчётов настроечных параметров стана PQF. Сравнение площадей поперечного сечения очага деформации по клетям стана PQF по разработанной ММ с результатами расчёта по программе «Program PQF_3R» для прокатки тонкостенных черновых труб с использованием СК 190 и 290 мм стана PQF представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение разработанной методики расчёта с расчётом по программе «Program PQF_3R»

№ клетки	F _{SMS} , мм ²	F _п , мм ²	П _Ф , %	№ клетки	F _{SMS} , мм ²	F _п , мм ²	П _Ф , %
калибр Ø190				калибр Ø290			
222x16,22 - 189,99x4,65				328x18,82 - 290,65x5,3			
1	6558,3	6517	0,63	1	11404,5	11520	-1,01
2	4260,3	4437	-4,15	2	7429,8	7876	-6,01
3	3185,9	3451	-8,32	3	5551,7	6082	-9,55
4	2768,9	2978	-7,55	4	4823,9	5255	-8,94
5	2707,6	2927	-8,10	5	4751,3	5192	-9,28
222x17,8 - 190,44x6,49				328x20,3 - 291,34x7,18			
1	7762,8	7725	0,49	1	13261,9	13410	-1,12
2	5444,6	5629	-3,39	2	9291,1	9755	-4,99
3	4288,0	4567	-6,51	3	7295,6	7850	-7,60
4	3824,0	4045	-5,78	4	6504,2	7011	-7,79
5	3750,6	4197	-11,90	5	6409,7	6961	-8,60

Как показано в таблице 4, погрешность при расчёте площади поперечного сечения очага деформации по «Program PQF_3R» относительно результатов расчёта по разработанной ММ в клетях 1, 2 достигает 6,01%, в клетях 3, 4, 5 - 11,9%. В таблице 5 и на рисунке 10 приведено сравнение результатов расчёта площадей ОД и коэффициентов вытяжки по клетям стана PQF с использованием: Program PQF_3R, программы QForm и разработанной ММ.

Таблица 5 - Сравнение результатов расчёта при прокатке на стане PQF раската наружным диаметром 190,16 мм, с толщиной стенки 8,36 мм

№ клетки	Program PQF_3R		Qform		ММ		П _Ф , %		П _μ , %	
	F, мм ²	μ	F, мм ²	μ	F, мм ²	μ	Qform/ PQF_3R	Qform/ ММ	Qform/ PQF_3R	Qform/ ММ
1	8976,8	1,402	8975,73	1,403	8935	1,409	-0,01	0,45	0,07	-0,43
2	6578,5	1,365	6907,08	1,299	6760	1,322	4,76	2,13	-5,08	-1,77
3	5336,3	1,233	5692,94	1,213	5608	1,205	6,26	1,49	-1,65	0,66
4	4829,4	1,105	5032,83	1,131	5024	1,116	4,04	0,18	2,29	1,33
5	4745,2	1,018	4967,56	1,013	4952	1,015	4,48	0,31	-0,49	-0,20

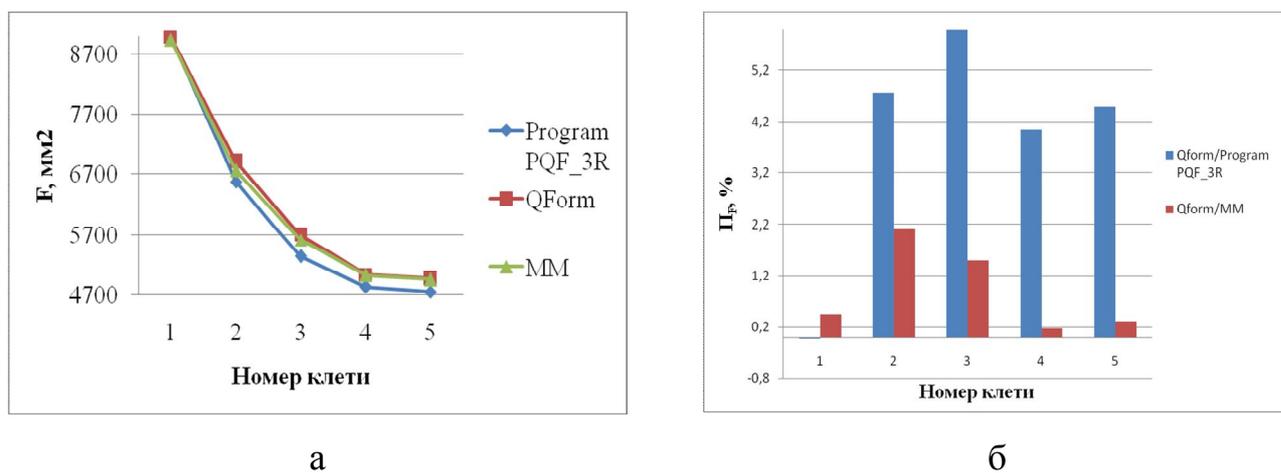


Рисунок 10 – Сравнение результатов расчёта с использованием различных программ: а – значение F_i по клетям; б – значение Π_p по клетям

Наилучшая сходимость результатов расчёта наблюдается при использовании разработанной ММ и QForm, погрешность не превышает 2,13 %.

Полученные зависимости также можно применять при анализе и разработке технологии прокатки труб в трёхвалковых калибрах. Например, формулы (23), (24) при расчёте частных обжатий по методике [58], в которой получены эмпирические зависимости для процесса редуцирования, которые также применимы при расчёте параметров прокатки для ИКС (параграф 2.4).

Таким образом, при использовании выведенных зависимостей и результатов работ [58, 132, 133, 149, 153], можно производить расчёт режимов деформации, энергосиловых параметров при прокатке в трёхвалковых калибрах на оправке и без оправки.

2.4 Сравнительная оценка расчёта параметров процесса прокатки по существующей и предложенной методике расчёта

В данном параграфе приведена оценка сходимости результатов расчёта параметров процесса прокатки для станов PQF и ИКС с использованием «Program PQF_3R» с расчётом, выполненным на основании данных источников [58, 132, 133, 152] и разработанной ММ.

В соответствии с работой [58] степень редуцирования наружного диаметра по клетям непрерывного безоправочного стана рассчитывается по формуле:

$$m_{крiz} = \frac{Bn^2(S_{i-1}/D_{i-1})^2}{A(1-S_{i-1}/D_{i-1})^2(1-\pi f_3 k/2n)},$$

где B – коэффициент, равный 559 для трехвалковых калибров ($B=593$ - для двухвалковых калибров);

n – число валков, образующих калибр;

S_{i-1}, D_{i-1} – толщина стенки и средний наружный диаметр редуцируемой трубы в предыдущей клетке соответственно;

D_{i-1} рассчитывается по формуле:

$$D_{i-1} = \frac{H_{i-1} + B_{i-1}}{2};$$

где H_{i-1} - высота калибра с учётом свода или развода валков, мм;

B_{i-1} - ширина трёхвалкового калибра с учётом свода или развода валков, мм.

Ширина трёхвалкового калибра вычисляется по формуле (24).

Коэффициент A рассчитывается следующим образом [58]:

$$A = \frac{2}{\sqrt{3}}(1 - Z_i)\sqrt{1 - a + a^2},$$

где Z_i – частный коэффициент пластического натяжения в данной клетке стана;

a – коэффициент, равный для тонкостенных труб 0,5;

f_3 – коэффициент трения на контакте металла с валками в момент захвата;

k - коэффициент, полученный путём аппроксимации опытных данных, учитывающий влияние температуры начала прокатки на величину критической частной деформации в калибре, рассчитываемый по формуле:

$$k = 33,07T^{-0,49},$$

T – температура металла, °С.

Формула к расчёту коэффициента трения (таблицы 6, 7) на контакте металла с валками [133]:

$$f_3 = K_{II} \cdot K_M \cdot K_C \cdot (0,84 - 0,0004 \cdot T),$$

где K_{Π} - коэффициент, учитывающий влияние состояния поверхности и материала валков;

K_M - коэффициент, учитывающий влияние марки стали;

K_C - коэффициент, учитывающий скорость прокатки.

Для стальных новых валков, грубо обточенных $K_{\Pi}=1\div 1,1$; изношенных с сеткой разгара $K_{\Pi}=1,1\div 1,2$. Для новых чугунных валков $K_{\Pi}=0,8\div 0,9$; с сеткой разгара $K_{\Pi}=1\div 1,1$. Для чугунных валков с отбеленной поверхностью $K_{\Pi}=0,8$.

Таблица 6 – Величина K_C в зависимости от скорости прокатки

Скорость прокатки, м/с	0÷2	3	4	5
K_C	1,1	0,93	0,76	0,67

Таблица 7 – Величина K_M в зависимости от содержания углерода в стали

Содержание углерода в стали, %	0,05÷0,2	0,2÷0,3	0,3÷0,5	0,5÷0,8	0,8÷1,2
K_M при установившемся процессе	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9
K_M в момент захвата металла валками	1,0	0,9	0,8	0,75	0,7

Скорость раската на выходе из клетки вычисляется по формуле:

$$V_i = V_{i-1} \cdot \mu_i,$$

где μ_i - коэффициент вытяжки, вычисляемый по разработанной ММ.

Овальность калибра рассчитывается по формуле:

$$\theta_i = \frac{B_i}{H_i};$$

Степень редуцирования в i -ой клетки ИКС рассчитывается по формуле:

$$m_i = \frac{D_{i-1} - D_i}{D_{i-1}} \cdot 100, \%;$$

Абсолютное обжатие по вершине калибра рассчитывается по формуле:

$$\Delta H_i = \frac{B_{i-1}}{2} - \frac{H_i}{2}, \text{ мм};$$

Показатель переполнения калибра рассчитывается по формуле:

$$\Delta B_i = \frac{B_i}{2} - \frac{H_{i-1}}{2}, \text{ мм}.$$

Значение величины ΔB_i со знаком «-» показывает, что в калибре будет наблюдаться переполнение и велика вероятность подреза раската галтелями валков.

Расчётная величина овальности калибров ИКС $\theta_{i,расч}$, равная отношению полуосей i -го калибра, определяется по соотношению [152]:

$$\theta_{i,расч} = \left(\frac{100}{100 - m_i} \right)^q,$$

где q – эмпирический коэффициент, учитывающий условия прокатки, конструкцию клетки, полученный на основании многолетней практики и опытных данных. Эмпирический коэффициент q рекомендован в пределах, приведенных в таблице 8.

Таблица 8 – Значение коэффициента q для расчёта овальности калибров

Тип марок стали	Тип клетки	
	Двухвалковая	Трёхвалковая
Углеродистые	1,5	1,23
Нержавеющие	2,8...3,5	2,4

Результаты расчёта по приведенной методике показали высокую сходимость с расчётом режимов обжатий и калибровок валков станов ИКС, РРС ПАО «ТАГМЕТ», рассчитываемых с использованием математической модели «SMS Meer».

В таблице 9 и на рисунке 11 в качестве примера, приведены расчётные параметры прокатки труб по TES CP-001, марки стали 22ХГ2А, наружным диаметром 177,8 мм, с толщиной стенки 10,36 мм с использованием СК стана PQF 241 мм.

Основные допущения, принятые при расчёте:

- величина падения температуры по клетям ИКС принята равной 10° С;
- величина толщины стенки раската по клетям принималась равной 9,74 мм;
- линейная скорость раската на входе в ИКС принималась равной линейной скорости раската на выходе за станом PQF (4000 мм/с);
- частный коэффициент пластического натяжения по клетям стана равен 0.

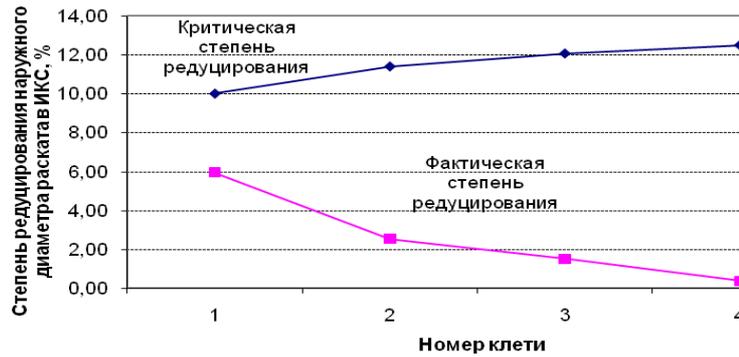


Рисунок 11 - Критическая и фактическая степень редуцирования по клетям ИКС при прокатке труб $\text{Ø}177,8 \times 10,36$ мм

Расчёты условия захвата с учётом работ [132, 133] и уточнённых формул для расчёта B_{i-1} показали высокую сходимость с промышленными результатами для стана PQF (таблица 10):

$$\arctg[K_{II} \cdot K_M \cdot K_C \cdot (0,84 - 0,0004 \cdot T)] > \arccos\left(1 + \frac{R_{on} + S_i - B_{i-1}}{R_{ок}}\right),$$

где B_{i-1} – ширина калибра, рассчитываемая по формуле (24), мм;

$R_{ок}$ - радиус валка по дну калибра, мм;

R_{on} - радиус оправки, мм;

S_i - толщина стенки по вершине калибра, мм.

Таким образом, показана высокая сходимость результатов расчёта условия захвата для стана PQF и параметров прокатки для стана ИКС с использованием «Program PQF_3R» с расчётом, выполненным на основании данных источников [58, 133, 152] и разработанной ММ. Уточнённая методика расчёта параметров процесса прокатки позволяет проводить научно обоснованный анализ режимов обжаты по клетям ИКС, РРС для всего сортаментного ряда с учётом компоновки комплектов клеток, температурных условий, калибровки валков и прокатываемого сортамента.

Таблица 9 - Расчётные параметры для стана ИКС при прокатке труб наружным диаметром 177,8 мм, с толщиной стенки 10,36 мм с использованием СК стана PQF 241 мм

Стан	№ клетки	$B_i/2$, мм	$H_i/2$, мм	S_i , мм	D_i , мм	T, °C	A_i	Б	n	k_i	K_{II}	K_M	K_C	f_i	$m_{крп}$, %	m_i , %	θ_i	$\theta_{расч}$	ΔH_i	ΔB_i	μ_i
PQF	5	130,23	119,99	9,74	250,22	1100											1,09				
ИКС	1	120,93	114,40	9,74	235,33	1090	1	559	3	1,07	0,85	1,2	0,76	0,313	10,02	5,95	1,06	1,08	15,83	0,94	1,066
	2	117,59	111,75	9,74	229,34	1080	1	559	3	1,08	0,85	1,2	0,76	0,316	11,42	2,55	1,05	1,03	9,18	3,19	1,027
	3	113,36	112,50	9,74	225,86	1070	1	559	3	1,08	0,85	1,2	0,76	0,319	12,09	1,52	1,01	1,02	5,09	1,61	1,016
	4	112,50	112,50	9,74	225,00	1060	1	559	3	1,09	0,85	1,2	0,76	0,322	12,52	0,38	1,00	1,00	0,86	0,00	1,004

Таблица 10 – Условие захвата при прокатке труб тонкостенного сортамента по TES CP-001, марки стали 22ХГ2А, наружным диаметром 219,0 мм, с толщиной стенки 6,0 мм с использованием СК стана PQF 241 мм при различной T^o

Исходные данные, мм							Дополнительные данные и расчеты										Условие захвата для клеток №1,2 стана PQF																
							Параметры для расчета f_3							Коэф. вытяжки		$R_{дк}$, мм				Линейная скорость на входе, мм/с		1 клеть					2 клеть						
							1 клеть			2 клеть				1 клеть	2 клеть	1 клеть		2 клеть		1 клеть	2 клеть	при $R_{дк}^{min}$			при $R_{дк}^{max}$			при $R_{дк}^{min}$			при $R_{дк}^{max}$		
R_f	S_f	S_1	S_2	$R_{вн}$	$B_i/2$	K_C	K_{II}	K_M	T°C	K_C	K_{II}	K_M	T°C			min	max	min	max			1 клеть	2 клеть	arc tg f_3	условие	arc cos α_3	arc tg f_3	условие	arc cos α_3	arc tg f_3	условие	arc cos α_3	arc tg f_3
138,5	17,45	10,44	7,79	115,05	139,28	1,1	0,85	0,9	900	1,1	0,85	0,9	890	1,616	1,467	300	350	302,5	352,5	1108,53	1791,39	0,384	>	0,296	0,384	>	0,274	0,387	>	0,331	0,387	>	0,307
						1,1	0,85	0,9	950	1,1	0,85	0,9	940									0,369	>	0,296	0,369	>	0,274	0,372	>	0,331	0,372	>	0,307
						1,1	0,85	0,9	1000	1,1	0,85	0,9	990									0,355	>	0,296	0,355	>	0,274	0,358	>	0,331	0,358	>	0,307
						1,1	0,85	0,9	1050	1,1	0,85	0,9	1040									0,340	>	0,296	0,340	>	0,274	0,343	>	0,331	0,343	>	0,307
						1,1	0,85	0,9	1100	1,1	0,85	0,9	1090									0,325	>	0,296	0,325	>	0,274	0,328	<	0,331	0,328	>	0,307
						1,1	0,85	0,9	1150	1,1	0,85	0,9	1140									0,309	>	0,296	0,309	>	0,274	0,313	<	0,331	0,313	>	0,307

Зависимости, приведенные в параграфах 2.1-2.4 также использовались для решения следующих задач:

1. Разработка технологического задания на проектирование нового ТПА для ПАО «СинТЗ» (2014 г.). Произведён расчёт режимов деформации непрерывного стана [120], извлекательно-калибровочного стана, редуционно-растяжного стана с использованием разработанной ММ и результатов работ [58, 132, 133, 149].

2. При анализе и совершенствовании технологии прокатки труб на ТПА со станом RQF ПАО «ТАГМЕТ» (2010-2014 г.), результаты работы отражены в источниках [55, 63, 119-123, 125, 126, 131, 150].

3. При анализе технологии прокатки труб на ТПА со станом FQM (ПАО «СТЗ», 2014 г.) в предпусковой и пусковой периоды [150, 159]. Произведён анализ режимов деформации для группы непрерывных станов (FQM, ИС, КС) с использованием полученных зависимостей и результатов эмпирических исследований работы [58], даны рекомендации по перераспределению обжатий для ИС и КС.

2.5 Мониторинг технологии прокатки труб на ТПА с трёхвалковым непрерывным раскатным станом

2.5.1 Основные положения

Из практики трубного производства известно, что на качество готовых труб влияет множество факторов (рисунок 12).



Рисунок 12 – Основные факторы, влияющие на качество бесшовных труб

Данные по качеству труб с проката показали, что одним из распространённых видов дефектов при прокатке труб тонкостенного сортамента с максимальным параметром D/S на ТПА со станом PQF является разнотолщинность стенки готовых труб.

В промышленных условиях был проведён мониторинг точности раската по линии ТПА со станом PQF с целью:

- оценки характеристик точности раската по горячему переделу на основе статистических методов исследования;
- изучения характера формоизменения раската по линии ТПА;
- определения наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на разнотолщинность стенки и количество дефектов прокатного происхождения на готовых трубах;
- оценки стабильности технологии процесса прокатки.

Под характеристиками точности понимаются параметры, характеризующие разнотолщинность стенки раската и готовых труб: среднеквадратичное отклонение, абсолютная и относительная разнотолщинность стенки, доли гранёности и эксцентрисности.

Измерения геометрических параметров проводились с августа 2011г. по апрель 2015 г.:

- на гильзах;
- на недокатах, образовавшихся в процессе прокатки на стане PQF;
- на раскатах за станами: PQF, ИКС, РРС;
- после операции правки;
- на готовых трубах.

Измерения геометрических параметров раската были проведены при прокатке труб с использованием всех СК стана PQF: 190, 241, 265, 290 мм (Приложение А).

При проведении мониторинга технологии на ТПА с трёхвалковым НРС [121, 122] использовалась методика М.Ф. Столетнего и Е.Д. Клемперта [86], которая включает в себя определение статистических характеристик точности

труб и позволяет оценить влияние различных факторов на точность труб. При измерении геометрических параметров раската по горячему переделу и на готовых трубах придерживались определённой ориентации в измерениях (рисунки 13-15), что является необходимым для корректной оценки характеристик точности [86].

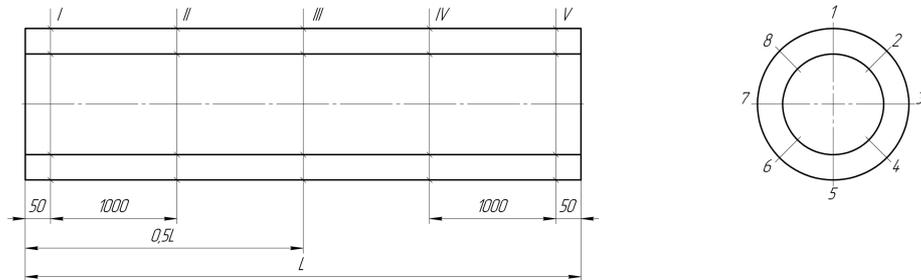


Рисунок 13 – Схема измерения геометрических параметров гильзы

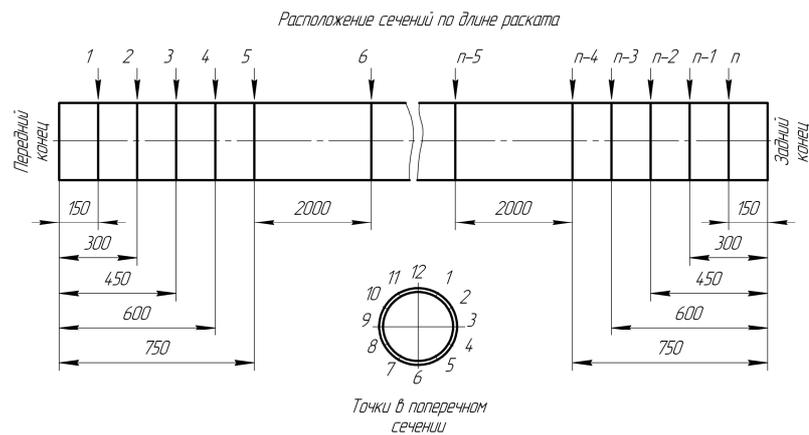


Рисунок 14 - Схема измерения геометрических параметров раската за ИКС

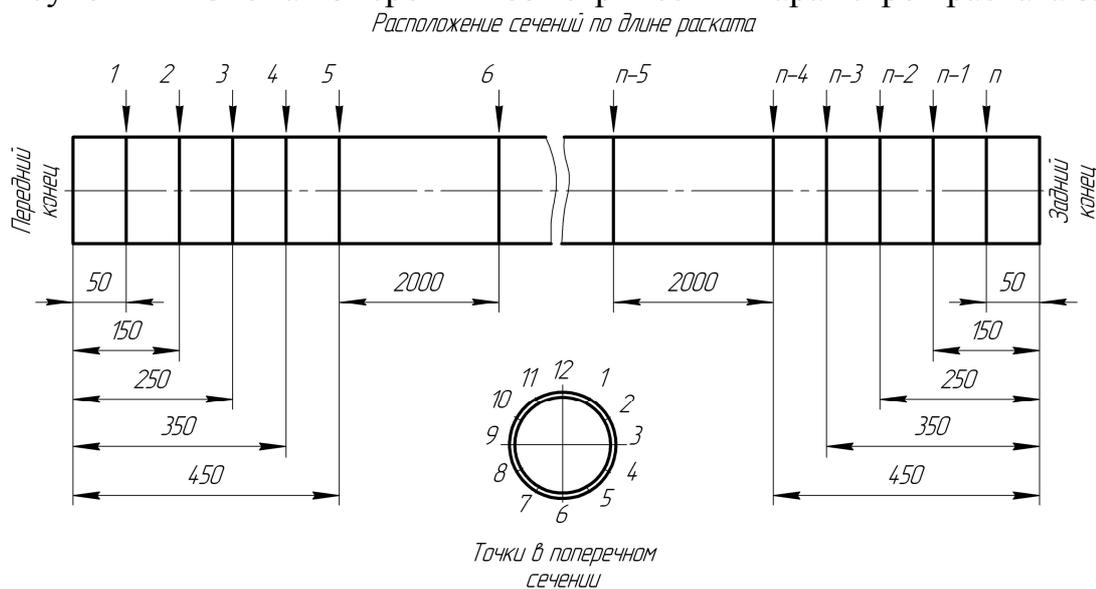


Рисунок 15 - Схема измерения геометрических параметров готовых труб

Основными отличиями в расчётах характеристик точности раската, приведенного в настоящей работе, от работы [86] являются:

1. Расчёт $A_{Э}$ и $A_{ГР}$ выполнен для раската по всему горячему переделу (не только для готовых труб);
2. Расчёт $A_{Э}$ и $A_{ГР}$ выполнен для отдельных поперечных сечений, располагающихся по длине раската, а не только для массива измерений, относящегося к партии труб, как указано в работе [86].
3. Расчёт $A_{Э}$ и $A_{ГР}$ сопоставлялся с величиной ΔS . При сопоставлении величин $A_{Э}$ и $A_{ГР}$ с величинами относительной разнотолщинности стенки наблюдались аналогичные результаты.
4. Предложен параметр, позволяющий численно оценить относительную разнотолщинность стенки готовых труб, обусловленную разнотолщинностью стенки гильз и качеством осевой настройки оборудования линии ТПА:

$$S_{\%г, осьТПА} = \left(1 - \frac{S_n - (\bar{S}_{A_3}^{\max} - \bar{S}_{A_3}^{\min})}{S_n} \right) \times 100\%,$$

где $\bar{S}_{A_3}^{\max}$ – среднее значение максимальных толщин стенки, принадлежащих поперечным сечениям готовой трубы, в которых $A_{Э} > 0,1$;

где $\bar{S}_{A_3}^{\min}$ – среднее значение минимальных толщин стенки, принадлежащих поперечным сечениям готовой трубы, в которых $A_{Э} > 0,1$.

5. Отличительные особенности по п. 1-4 не противоречат данным работы [86].

Далее приведены формулы для расчёта характеристик точности раската в соответствии с работой [86] и пунктами 1-4.

Среднеквадратичное отклонение толщины стенки раската в отдельном поперечном сечении вычисляется по формуле:

$$\sigma_S^2 = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l (S_{\varphi_k} - \bar{S})^2,$$

где S_{φ_k} – толщина стенки, измеренная в данном сечении, отстоящем на угол отсчёта φ_k , мм;

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

l – количество измерений.

Для вычисления эксцентриситета (раската или готовых труб) используется зависимость:

$$E = - \frac{\sum_{k=1}^l S_{\varphi_k} \cdot \cos \varphi_k}{\sum_{k=1}^l \cos^2 \varphi_k},$$

где φ_k - угол, рад.

Эксцентricность наружной и внутренней поверхностей трубы находится по формуле:

$$\sigma_{SЭ}^2 = \frac{E^2}{2}.$$

Доля, вносимая в отклонение толщины стенки эксцентricностью и гранённостью раската вычисляется по формуле:

$$A_Э = \frac{\sigma_{SЭ}^2}{\sigma_S^2},$$

$$A_{ГР} = 1 - A_Э.$$

Коэффициент вариации вычисляется по формуле:

$$v_D = \frac{\sigma_D}{D} \cdot 100,$$

где σ_D - среднеквадратичное отклонение величины наружного диаметра труб в партии;

\bar{D} – среднее значение диаметра в партии труб, мм.

2.5.2 Численная оценка характеристик точности раската по горячему переделу на ТПА со станом PQF

Построение гистограмм, характеризующих вероятностный закон распределения толщины стенки для готовых труб с параметром $D/S > 27$, показало, что их характер несколько отличен от нормального закона распределения. В частности, на гистограммах наблюдается два максимума, приблизительно соответствующих толщинам стенки 5,9 мм, 6,2 мм для труб $\varnothing 219 \times 6,0$ мм,

прокатанных с использованием СК стана PQF 265 мм (рисунок 16), причём, закон распределения толщины стенки гильз носит нормальный характер.

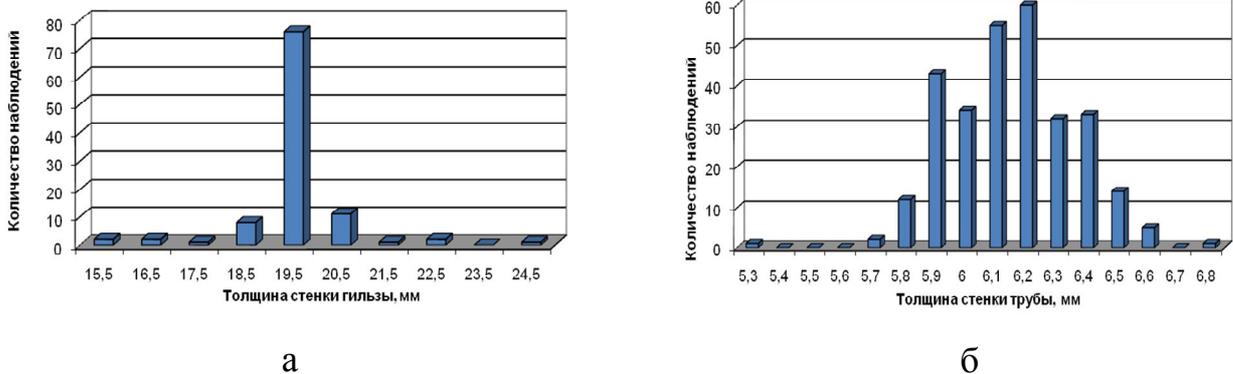


Рисунок 16 – Частотное распределение толщины стенки гильз и труб при прокатке с использованием СК стана PQF 265 мм (сталь 20):

а - гильз наружным диаметром 303 мм с толщиной стенки 18,6 мм (далее по тексту: $\text{Ø}303,0 \times 18,6$ мм); б - труб $\text{Ø}219 \times 6,0$ мм

Следует отметить, что при прокатке на ТПА со станом PQF с использованием СК 190 мм частотное распределение толщин стенки труб соответствует нормальному закону распределения, что также согласуется с измерениями толщины стенки труб [118], прокатанных на ТПА 5,5” IPSCO с двухвалковым непрерывным раскатным станом с плавающей оправкой (стан ТМК-IPSCO, установленный в г. Эмбридж, штат Пенсильвания, США). Таким образом, наличие двух максимумов на гистограммах для труб, прокатанных на ТПА со станом PQF с параметром $D/S > 27$, не является случайным и связано с технологическими причинами.

Формирование поперечной разнотолщинности стенки раската и на готовых трубах с параметром $D/S > 27$ по линии ТПА со станом PQF приведено на рисунке 17.

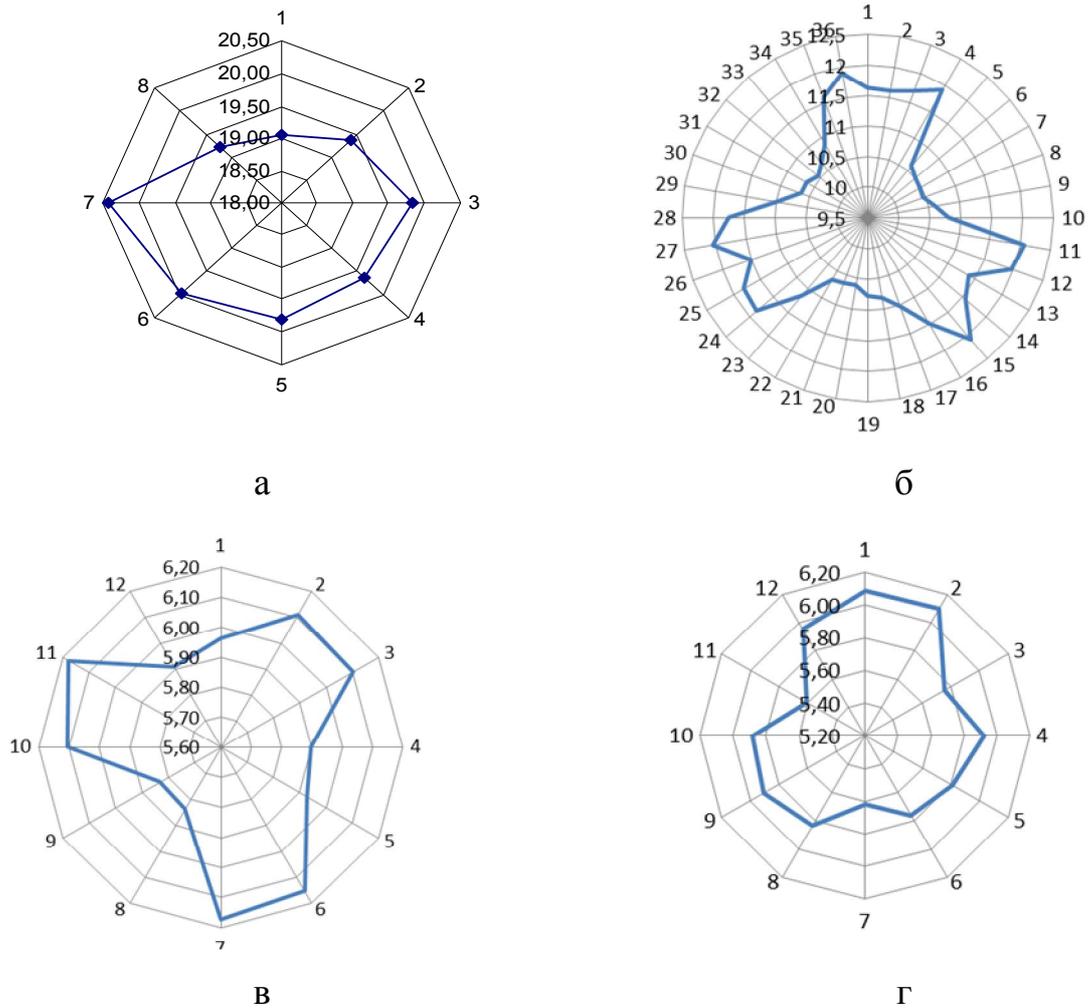


Рисунок 17 - Формирование поперечной разнотолщинности стенки тонкостенных труб на ТПА со станом PQF в общем виде при прокатке с использованием СК: 190, 241, 265, 290 мм: а – гильза, б – раскат за ИКС, в – раскат (плеть) за РРС; г – готовая труба

При прокатке труб $\text{Ø}168,0 \times 8,9$ мм с использованием СК стана PQF 190 мм величина ΔS на раскате за ИКС и готовых трубах, вызвана неравномерностью деформаций по периметру калибров стана PQF и повышенной долей эксцентриситеты на раскате (рисунки 18-20). Величина ΔS в сечениях с повышенной A_3 превосходит величину ΔS в сечениях с повышенной $A_{ГР}$, параметр $S_{\% \text{, ось ТПА}}$ равен 6,4%. Следует отметить, что при прокатке труб с использованием СК стана PQF 190 мм при стабильной работе ТПА параметр $S_{\% \text{, ось ТПА}}$ не превышает 1,0% (0,01 при расчёте в долях).



Рисунок 18 – Распределение A_{Δ} и $A_{ГР}$ по длине гильзы наружным диаметром $\varnothing 222 \times 19,82$ мм, марка стали 32Г2А

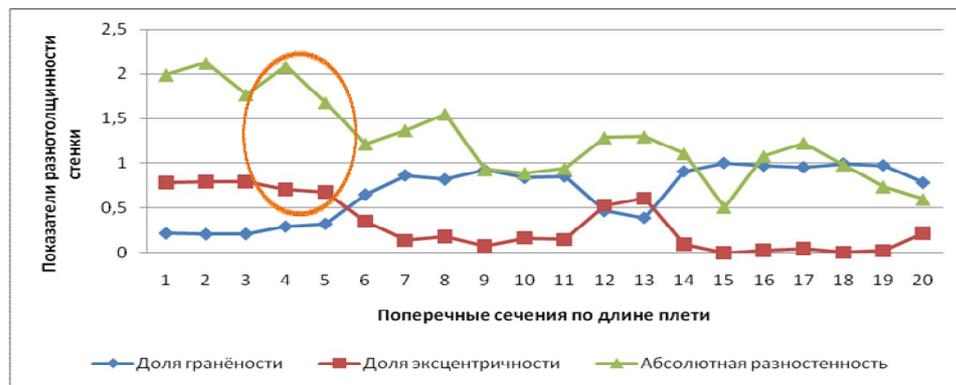


Рисунок 19 – Распределение ΔS , A_{Δ} и $A_{ГР}$ по длине раската за станом ИКС, полученного с использованием СК стана PQF 190 мм, марка стали 32Г2А (плеть двукратная)

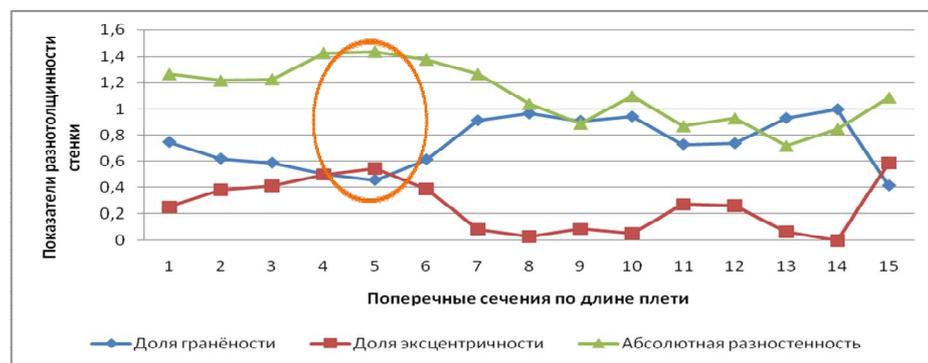


Рисунок 20 – Распределение ΔS , A_{Δ} и $A_{ГР}$ по длине готовой трубы $\varnothing 168 \times 8,9$ мм, полученной с использованием СК стана PQF 190 мм, марка стали 32Г2А (приведена одна труба с плети)

При прокатке труб с использованием СК стана PQF 241 мм максимальная величина ΔS на раскате за ИКС и готовых трубах, вызвана неравномерностью деформаций по периметру калибров стана PQF и повышенной долей эксцентricности на раскате (рисунки 21-23). Максимальная величина ΔS зафиксирована в сечениях с повышенной долей $A_{\text{Э}}$, в этих же сечениях в соответствии с протоколами УЗК наблюдалась минимальная толщина стенки на готовых трубах (параметр $S_{\% \text{, ось ГПА}}$ равен 12,1%).

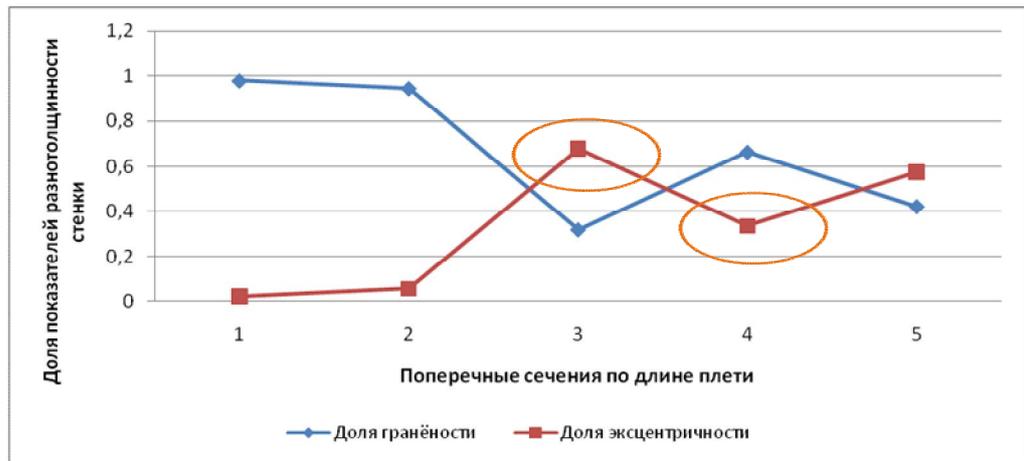


Рисунок 21 – Распределение $A_{\text{Э}}$ и $A_{\text{ГР}}$ по длине гильзы наружным диаметром $\text{Ø}277 \times 17,45$ мм (сталь 20)

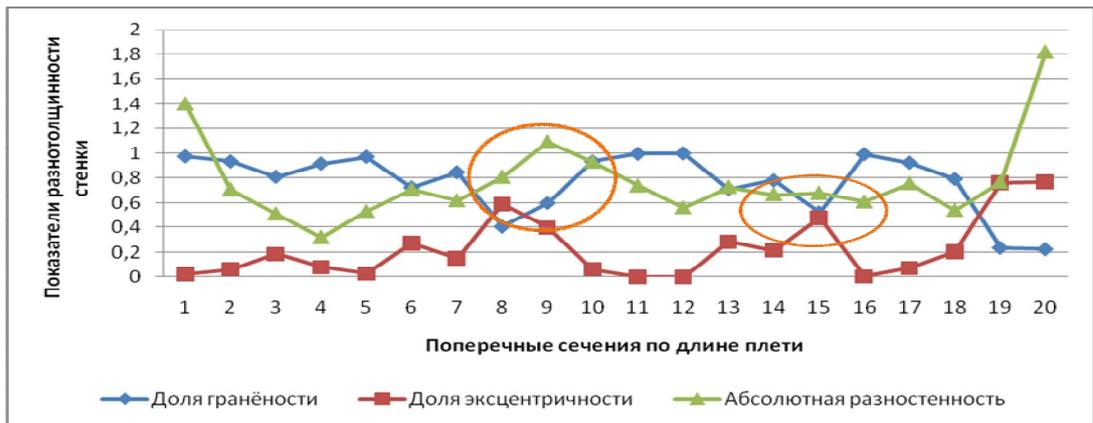


Рисунок 22 – Распределение ΔS , $A_{\text{Э}}$ и $A_{\text{ГР}}$ по длине раската за станом ИКС, полученного с использованием СК стана PQF 241 мм (сталь 20, плетъ двукратная)



Рисунок 23 – Распределение ΔS , A_{Σ} и $A_{ГР}$ по длине готовой трубы $\varnothing 219 \times 6,0$ мм, полученной с использованием СК стана PQF 241 мм (сталь 20, приведено две трубы для одной плети)

При прокатке труб с использованием СК стана PQF 265 мм максимальная величина ΔS на раскате за ИКС и на готовых трубах, вызвана неравномерностью деформаций по периметру калибров стана PQF и повышенной долей эксцентрисичности на раскате (параметр $S_{\%2,осьТПА}$ равен 11,7%), максимальная величина ΔS зафиксирована в сечениях с повышенной долей A_{Σ} (рисунки 24, 25).

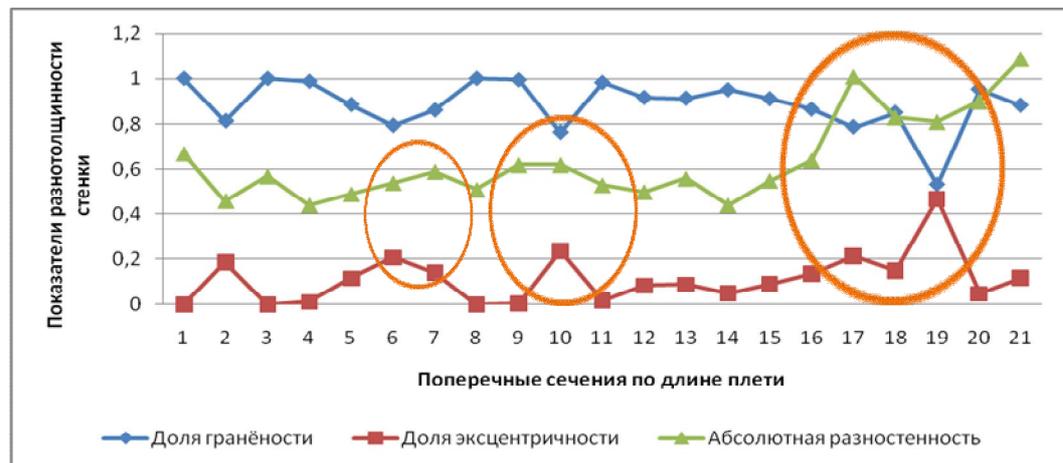


Рисунок 24 – Распределение ΔS , A_{Σ} и $A_{ГР}$ по длине раската за станом ИКС, полученного с использованием СК стана PQF 265 мм (сталь 20, плеть двукратная)

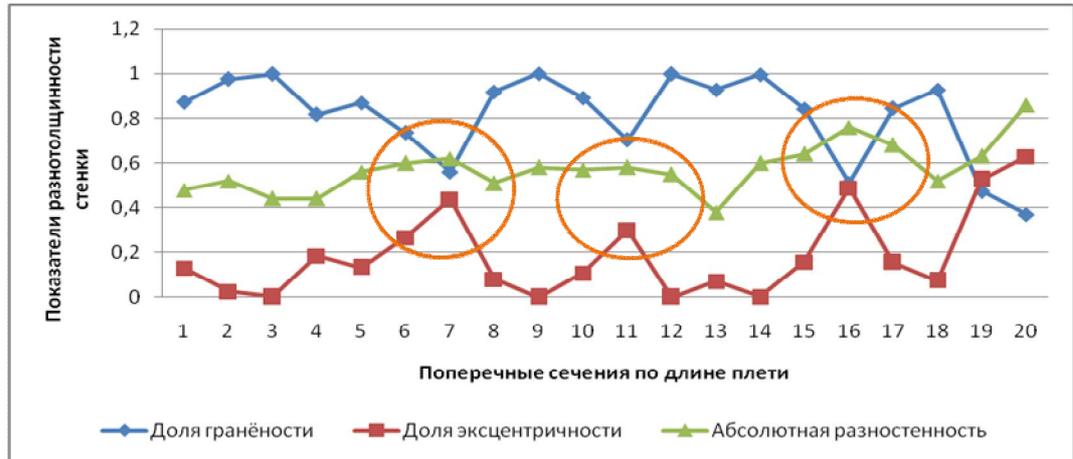


Рисунок 25 – Распределение ΔS , $A_{Э}$ и $A_{ГР}$ по длине готовой трубы $\varnothing 219 \times 6,0$ мм, полученной с использованием СК стана PQF 265 мм (сталь 20, приведено две трубы для одной плети)

Анализ, представленных выше результатов, позволяет сделать следующие выводы:

1. На гильзах, прокатываемых с использованием прошивного стана с дисками Дишера, преобладала доля эксцентricности. На раскате за станом PQF наблюдалось резкое увеличение доли гранёности. Гранёность, образовавшаяся на стане PQF, распространялась на раскат за ИКС, за PPS и на готовые трубы.

2. Точность труб напрямую зависит от точности геометрических параметров гильз, особенно при прокатке труб с использованием СК стана PQF 241 и 265 мм. Повторяемости результатов не всегда удаётся достигнуть из-за неравномерного износа оправок прошивного стана, что в свою очередь связано с необходимостью обеспечения заданной производительности ТПА.

3. Точность труб напрямую зависит от своевременности и качественного проведения мероприятий по осевой настройке оборудования станов линии ТПА. Оценку качества осевой настройки прошивного стана и стана PQF можно производить на основании анализа распределения усилий на гидрокапсулы по клетям стана PQF в реальном времени.

4. Низкое значение коэффициента вариации наружного диаметра для каждой из партий готовых труб свидетельствовал об удовлетворительной

настройке РРС, правильных машин и рекалибровочного стана, а готовые трубы полностью соответствовали требованиям, предъявляемым к овальности по наружному диаметру, кривизне и прямолинейности. Для труб, не прошедших термообработку и рекалибровку, коэффициент вариации был высок.

5. В технологической цепочке линии ТПА со станом PQF узким местом с точки зрения возникновения дефектов прокатного происхождения различного вида, является прошивной стан и стан PQF. В любом случае, даже при неудовлетворительном качестве гильзы, повышенная неравномерность деформаций в СК стана PQF способствует увеличению дефектов различного вида и росту относительной разнотолщинности стенки на готовых трубах.

6. Совершенствование системы автоматизации станом MPM, PQF, FQM, разработка новых систем для контроля геометрических параметров раската, например, позволяющих оперативно определить долю эксцентricности раската по переделу, с использованием данных работы [86] и проведённых исследований, является актуальной задачей, решение которой позволит оперативно выявлять нарушения технологии прокатки по линии ТПА и существенно сократит РКМ.

С учётом проведённого мониторинга определено, что при анализе и проведении промышленных прокаток, опытно-промышленных работ особое внимание следует уделять:

1. Соблюдению технологических режимов прокатки (ТУ, ТИ);
2. Осевой настройке оборудования линии ТПА;
3. Износу инструмента (равномерный, неравномерный, локальный);
4. Мониторингу характеристик точности раската по горячему переделу с целью выявления нарушения технологии прокатки и своевременной разработки корректирующих действий.

5. Анализу распределения усилий на гидрокапсулы по клетям стана PQF, которые косвенно отражают качество гильз и осевой настройки оборудования прошивного стана и стана PQF.

2.6 Анализ особенностей формоизменения раската в системах калибров стана PQF

В период с 2010 по 2014 г. были исследованы недокаты, образовавшиеся в процессе прокатки на стане PQF с использованием различных СК (таблица 11). Недокаты имели вид раската с переменной толщиной стенки и диаметрами, которые соответствовали заданным режимам деформирования.

Стоит отметить, что образование недоката при прокатке всегда связано с форс-мажорными обстоятельствами, а торможение раската осуществляется за 0,5 секунды, поэтому информацию, приведенную в данном параграфе, можно использовать лишь для качественной оценки технологии прокатки на стане PQF (сравнение параметров по критерию: больше/меньше).

Таблица 11 – Параметры процесса прокатки при образовании недокатов в различных СК стана PQF

СК стана PQF, мм	Геометрические параметры раската за пятой клетью стана PQF, мм	Параметр $\Delta S/S$ в первой клетке, % (не более, по факту)	Параметр $\Delta S/S$ во второй клетке, % (не более, по факту)
190	$\text{Ø}190,00 \times 9,25$	15,0-17,0	34,5
265	$\text{Ø}268,06 \times 11,18$	20,0-25,6	40,15
290	$\text{Ø}291,06 \times 7,14$	30,0-40,0	50,0-61,5

Недокат, полученный при прокатке с использованием СК 265 мм был порезан на дисковых пилах на патрубки, схема раскроя представлена на рисунке 26.

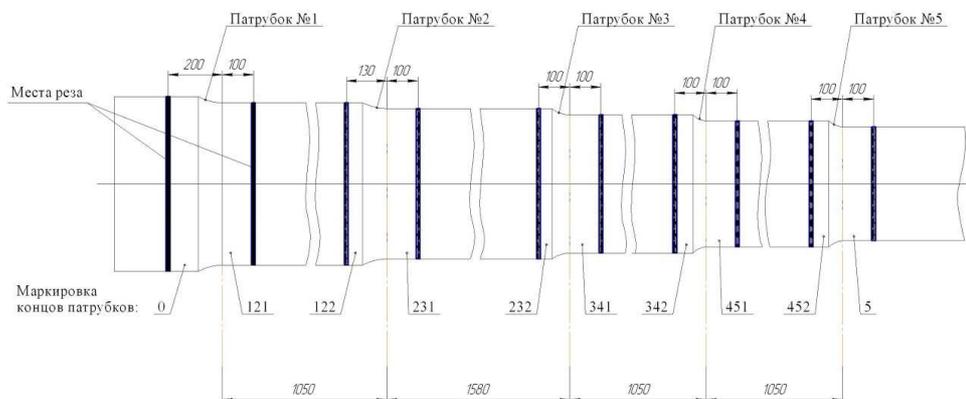


Рисунок 26 – Схема раскроя и маркировки недоката

После порезки каждый патрубок был сфотографирован в поперечном сечении, которое соответствовало очагу деформации на выходе из i -ой клетки стана PQF, также были сделаны измерения толщины стенок недоката, которые осуществлялись ультразвуковым толщиномером с шагом в 10° по периметру на входе и на выходе из i -ой клетки (рисунок 27).

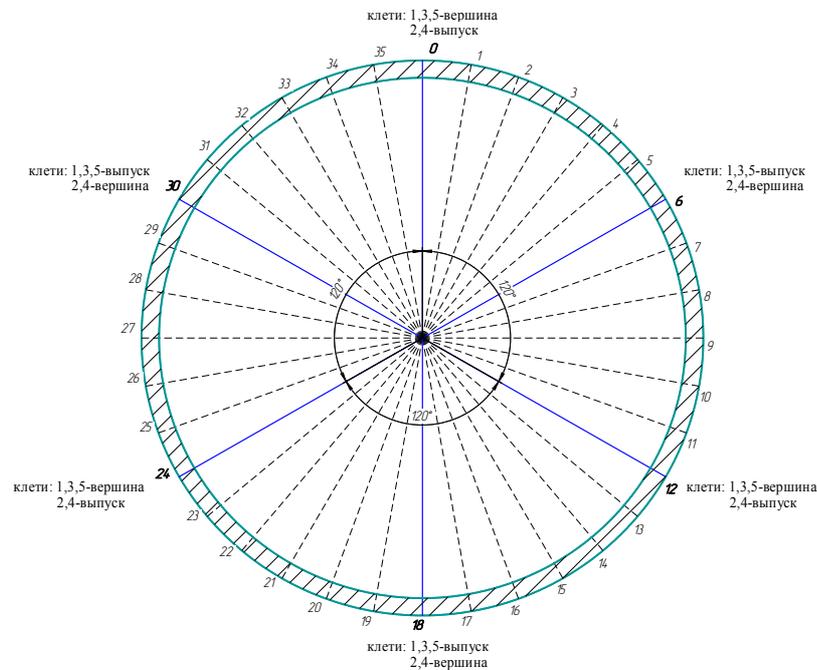


Рисунок 27 – Общая схема измерений толщины стенок недоката по контрольным точкам в i -ом сечении

При визуальном осмотре на недокатах (рисунок 28) после первой и второй клеток стана наблюдался шов прокатки, классифицируемый для труб в соответствии с источником [154], как «ус». Следует отметить, что шов прокатки сформировался при параметрах $\Delta S/S$ не превышающих максимальные значения (см. таблица 11 и рисунок 3, б).

В работе [13] также указывается, что в первой и второй клетях трёхвалкового НРС помимо обжимной зоны калибра и зоны выпусков в деформации раската участвуют галтели, что недопустимо и свидетельствует о чрезмерном истечении металла в зазор между валками.

Характер распределения толщины стенки в поперечном сечении раската на выходе из пятой клетки стана PQF представлен на рисунке 29. Такой характер справедлив для всех калибров стана PQF при прокатке тонкостенного сортамента.



а



б



в

Рисунок 28 – Шов прокатки, образовавшийся в процессе раскатки гильз с использованием:

- а – СК 290 мм стана PQF (ОД второй клетки, вид сверху);
- б - СК 265 мм стана PQF (ОД на выходе из первой клетки);
- в - СК 190 мм стана PQF (ОД на выходе из первой клетки)

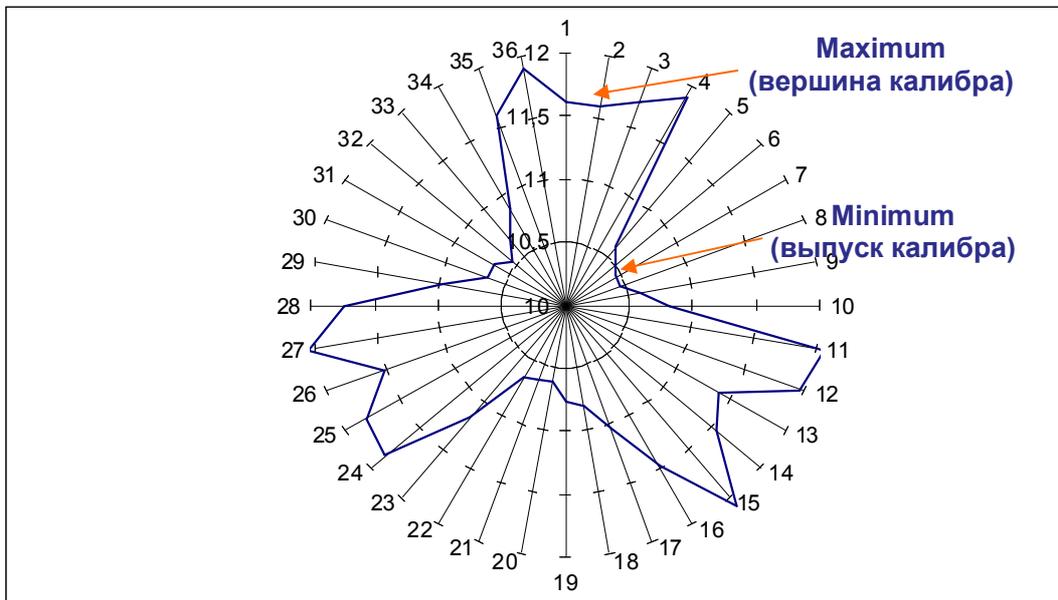


Рисунок 29 – Характер распределения толщины стенки в поперечном сечении раската на выходе из пятой клетки стана PQF

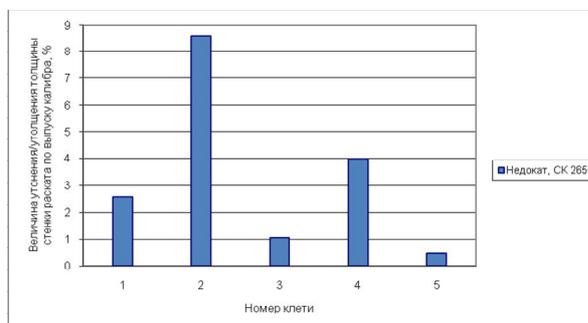
Толщины стенок и характеристики точности раската по клетям стана PQF приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Толщины стенок и характеристики точности раската по клетям стана PQF при прокатке с использованием СК 265 мм [121, 122]

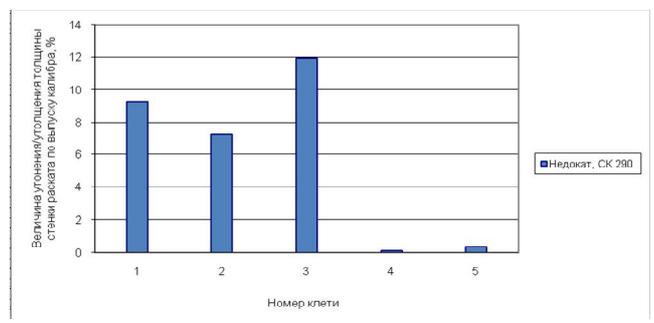
Параметр	Единица измерения	№ точки по периметру ОД	вершина/ выпуск (клеть 1)	Значения параметра по клетям PQF				
				Клеть 1	Клеть 2	Клеть 3	Клеть 4	Клеть 5
Толщина стенки	мм	0	вершина	22,27	18,20	13,37	10,80	11,62
		30		22,37	18,99	14,26	12,97	11,91
		60	выпуск	25,01	20,66	15,93	13,26	10,46
		90		22,60	20,10	16,02	13,69	10,81
		120	вершина	22,32	17,90	13,69	11,54	11,39
		150		22,35	18,40	15,10	12,90	11,48
		180	выпуск	25,08	20,51	16,01	13,14	10,77
		210		22,47	17,94	14,43	12,22	10,66
		240	вершина	22,63	17,80	13,50	10,89	11,81
		270		23,00	19,62	15,20	13,29	11,74
		300	выпуск	25,42	20,83	16,06	13,58	10,65
330		22,60	18,70	15,55	13,65	10,88		
Средняя толщина стенки	мм			23,18	19,14	14,93	12,66	11,18
E	мм			0,01	0,29	0,00	0,19	0,06
$\sigma_{S_0}^2$	мм ²			5×10^{-5}	0,04	9×10^{-8}	0,02	0,00
σ_S^2	мм ²			1,37	1,22	0,99	1,01	0,25
Aэ				4×10^{-5}	0,04	9×10^{-8}	0,02	0,01
Aгр				1,00	0,96	1,00	0,98	0,99
Абсолютная разнотолщинность стенки, мм				3,15	3,03	2,69	2,89	1,45
Относительная разнотолщинность стенки, %				13,59	15,83	18,02	22,83	12,97

Доля гранёности по клетям стана PQF, в измеренных поперечных сечениях недоката, равна 96-100% (аналогично для недоката, образовавшегося с использованием СК стана PQF 290 мм).

На рисунке 30 показано, что толщина стенки в выпуске калибра по всем клетям стана PQF, как для СК 265 мм, так и для СК 290 мм, утоняется в процессе деформации, а в двух последних клетях стана величина утонения не превышает 4,0%, где коэффициент вытяжки составляет от 1,010 до 1,135.



а



б

Рисунок 30 – Величина утонения толщины стенки раската с использованием СК стана PQF: а – 265 мм; б – 290 мм

На рисунке 31 показано, что при прокатке в трёхвалковом НРС величина утонения толщины стенки может принимать как меньшие, так и большие значения в сравнении с прокаткой в двухвалковых НРС (по формулам 1, 2) с учётом равенства коэффициентов вытяжки по клетям, однако это не согласуется с исследованиями, проведёнными с использованием среды QForm [120].

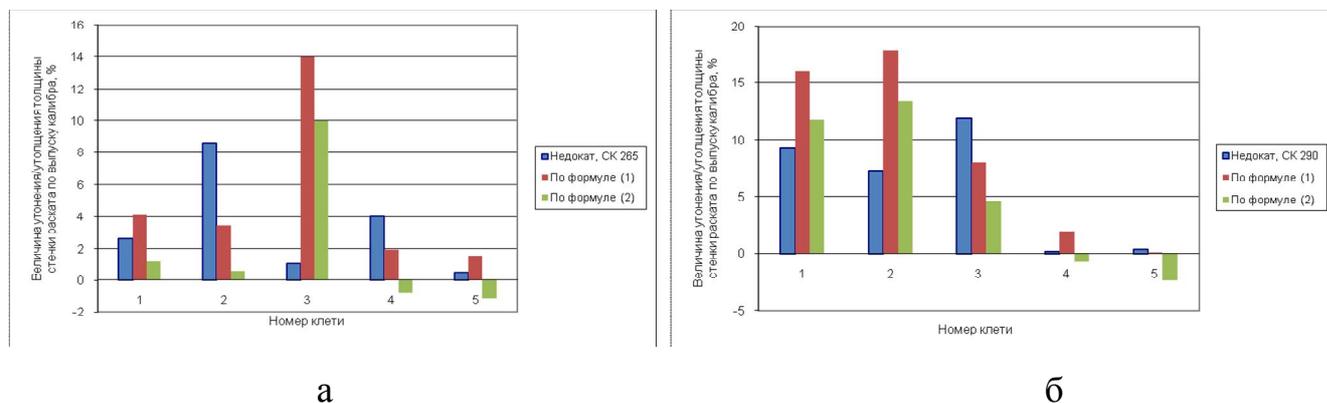


Рисунок 31 – Величина утонения/утолщения толщины стенки раската с использованием СК стана PQF: а – 265 мм; б – 290 мм

На рисунке 32 показана зависимость величины утонения и утолщения толщины стенки раската по линии разъёма валков при прокатке в калибрах от коэффициента «х», полученная на основании результатов исследования недокатов.

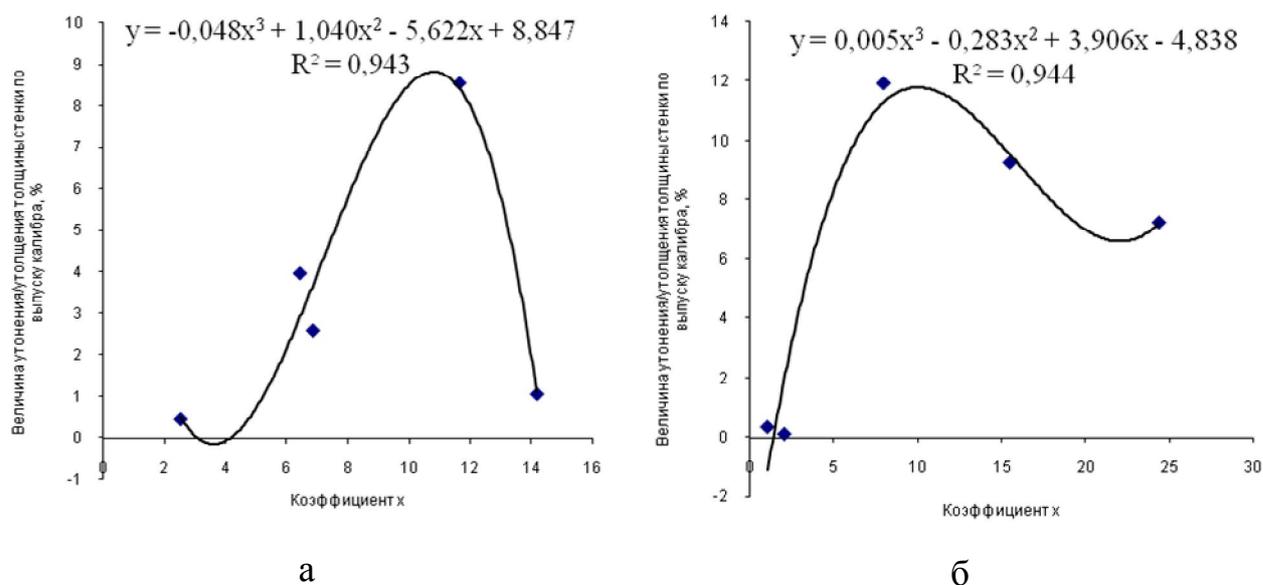


Рисунок 32 – Зависимость величины утонения и утолщения толщины стенки раската от коэффициента «х» при прокатке с использованием СК стана PQF: а – 265 мм; б – 290 мм

Коэффициент «х» рассчитывается по формуле:

$$x = \frac{(S_{i-1} - S_i) \cdot \mu_i^2}{\theta_i^2}.$$

Данные по утонению и утолщению толщины стенки по линии разъёма валков при прокатке в трёхвалковых НРС требуют дополнительных исследований, так как промышленные данные имеют расхождение с результатами QForm [120], а результаты исследования недокатов нельзя считать достоверными на 100%, так как получение недоката всегда связано с форс-мажорными обстоятельствами.

По данным УЗК брак по разнотолщинности готовых труб с $D/S > 27$ может достигать более 5,0%. В феврале 2014 г. брак по разрывам на трубах наружным диаметром 219 мм с толщиной стенки 6-8 мм составил 0,12% (дефект вида «скворечник» в процентном соотношении от прокатанных труб, количество труб 5000 шт.).

На основании проведённых исследований, можно сделать вывод, что при прокатке раската в системах калибров стана PQF наблюдается значительная неравномерность деформации.

В то же время возможно несколько путей совершенствования технологии прокатки труб в трёхвалковых НРС с целью снижения брака на готовых трубах:

- снижение коэффициента вытяжки, получаемого на стане PQF, за счёт уменьшения диаметра заготовки или наружного диаметра и толщины стенки гильзы;

- совершенствование технологии прокатки путём изменения калибровки валков стана PQF.

Уменьшение диаметра заготовки или наружного диаметра и толщины стенки гильзы ограничено технологическими параметрами:

- наличием необходимого кристаллизатора;
- производительностью ТПА.

Рациональным вариантом совершенствования технологии прокатки является совершенствование калибровки валков стана PQF.

С целью уточнения полученных данных целесообразно провести анализ систем калибров стана PQF и компьютерное моделирование процесса прокатки на стане PQF.

2.7 Анализ калибровки валков стана PQF

Калибровка валков стана PQF в клетях № 1, 2 выполнена с овальной обжимной зоной и выпусками по радиусу, калибровка валков в клетях № 3, 4, 5 выполнена с круглой обжимной зоной и выпусками по радиусу (далее по тексту – СК SMS, Приложение А). Основные функции клеток стана PQF в процессе прокатки приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Основные функции клеток стана PQF в процессе прокатки

№ Клетей	Функции клетки	
Первая	Обеспечение условия захвата	Обеспечение максимального коэффициента вытяжки
Вторая		Обеспечение максимального коэффициента вытяжки
Третья		Равномерное обжатие толщины стенки раската
Четвёртая		Формирование участков толщины стенки раската, соответствующих зоне выпуска и переходной зоне ОД третьей клетки
Пятая		Окончательное формирование толщины стенки по всему периметру ОД: обжимная зона, переходная зона, зона выпуска

Из практики трубного производства известно, что такие геометрические параметры калибровки валков, как величина эксцентриситета центральной обжимной зоны, величина овальности и радиусы галтелей должны уменьшаться в направлении хода прокатки с целью обеспечения равномерной деформации по клетям НРС, причём с уменьшением диаметра калибра данные геометрические параметры также должны уменьшаться. Распределение, приведенных геометрических параметров калибровки валков по клетям СК SMS, не отвечает вышеприведенным известным рекомендациям (рисунки 33-35).

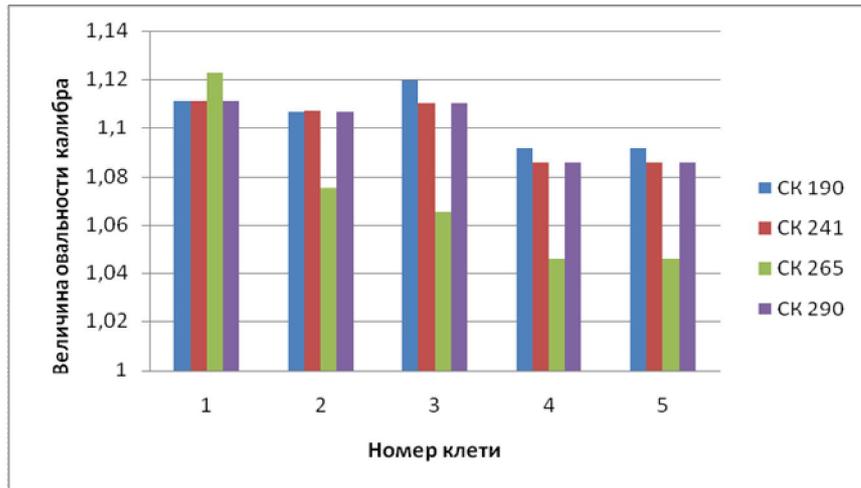


Рисунок 33 – Величина овальности СК SMS

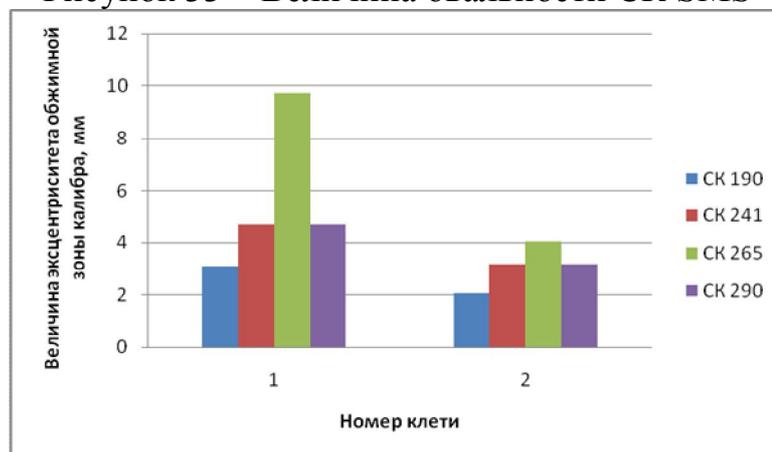


Рисунок 34 – Величина эксцентриситета СК SMS

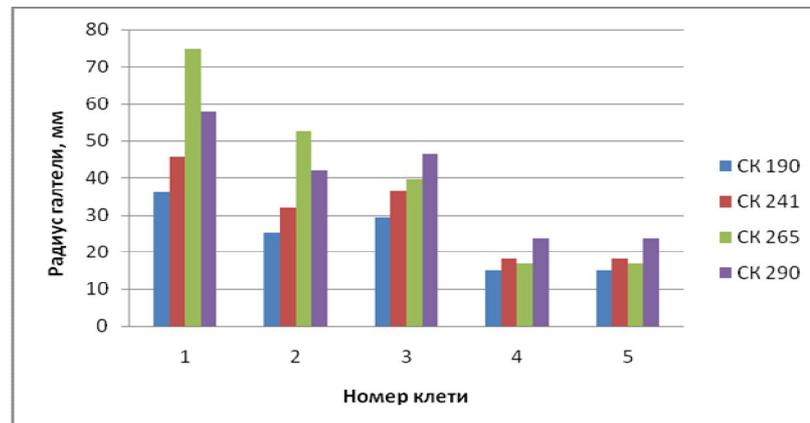


Рисунок 35 – Радиусы галтелей СК SMS

При прокатке раската в системах калибров стана PQF 190, 241, 265, 290 мм используются гильзы наружным диаметром 222, 277, 303, 328 мм соответственно. Калибр считается переполненным, если в деформации раската задействованы галтели (рисунок 36), что приводит к повышению усилий на валки и к образованию дефектов различного вида на готовых трубах. По технологии,

разработанной поставщиком оборудования, показатель переполнения калибра металлом (ΔB) в первой клетке стана PQF для СК 190 мм равен «- 1,86 мм». Соответственно, уже на стадии проектирования СК 190 мм поставщиком оборудования было допущено, что в деформации гильзы в первой клетке будут задействованы галтели.

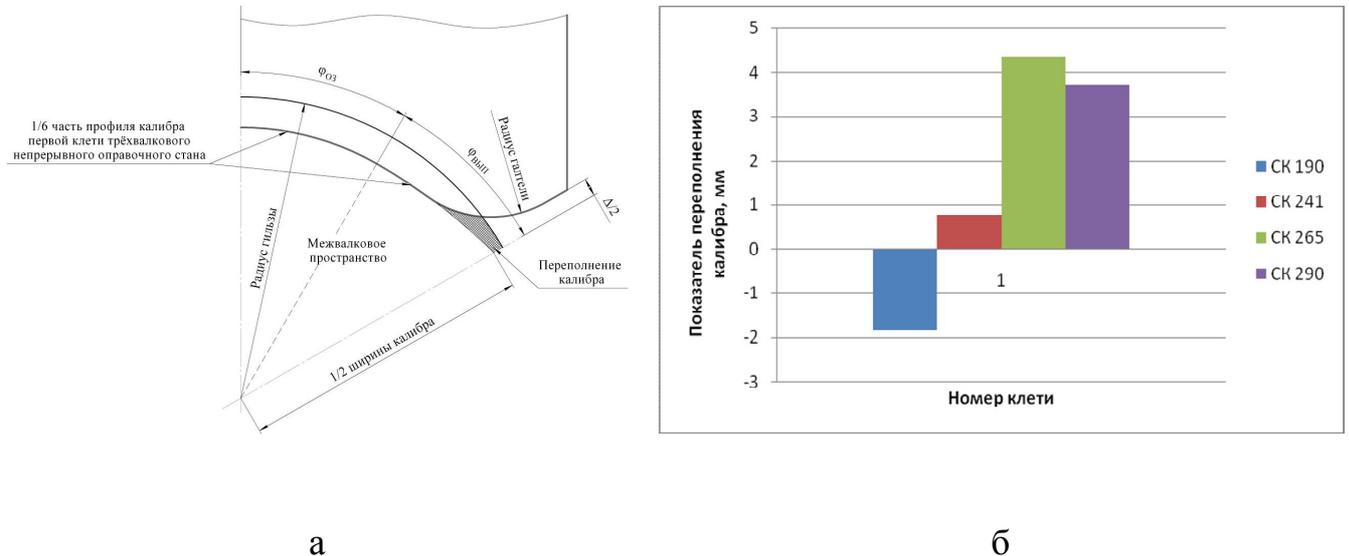


Рисунок 36 – Переполнение первой клетки СК SMS:

а – сопоставление 1/6 части калибра первой клетки СК 190 мм стана PQF с наружным диаметром гильзы;

б – показатель переполнения калибров металлом

Точность труб также зависит от параметра $\varphi_{O3} / \varphi_{вып}$. Параметр $\varphi_{O3} / \varphi_{вып}$ выбирают так, чтобы деформация раската в СК осуществлялась равномерно и обеспечивалась минимальная разнотолщинность стенки раската на выходе из ОД последней клетки НРС. Величина углов в обжимной зоне предчистовых и чистовых калибров (φ_{O3}) выбирается таким образом, чтобы переходная зона и зона выпуска калибров ($\varphi_{вып}$) предыдущих клеток были гарантированно перекрыты. При $\varphi_{O3} / \varphi_{вып} > 1$ гарантируется равномерное распределение толщины стенки раската по периметру ОД даже в случае поворота раската в калибре при незначительном смещении оси прокатки. При $\varphi_{O3} / \varphi_{вып} = 1$, в случае поворота раската в калибре, одинаковую толщину стенки по всему периметру ОД получить не удастся, так как часть толщины стенки раската не будет подвержена

деформации в обжимных зонах чистовых калибров. В случае, когда $\varphi_{оз} / \varphi_{вып} < 1$, повышенная разнотолщинность стенки раската по периметру ОД в клетях будет наблюдаться даже при отсутствии смещения оси прокатки.

У калибровок двухвалковых станов: ТПА 159-426 АО «ВТЗ», ТПА 30-102 ОАО «ПНТЗ», ТМК-IPSCO, г. Эмбридж отношение $\varphi_{оз} / \varphi_{вып}$ в предчистовых и чистовых калибрах составляет от 1,25 до 2,00. У проектных калибровок стана PQF, это соотношение составляет от 0,88 до 1,00 (рисунок 37, 38). При прокатке в конце прокатной кампании валков данный фактор будет ещё в большей степени сказываться на качестве готовых труб.

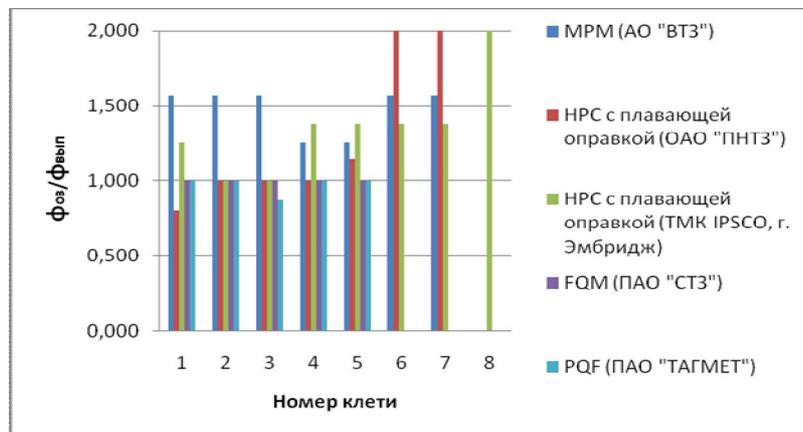


Рисунок 37 – Параметр $\varphi_{оз} / \varphi_{вып}$ по клетям НРС различного типа

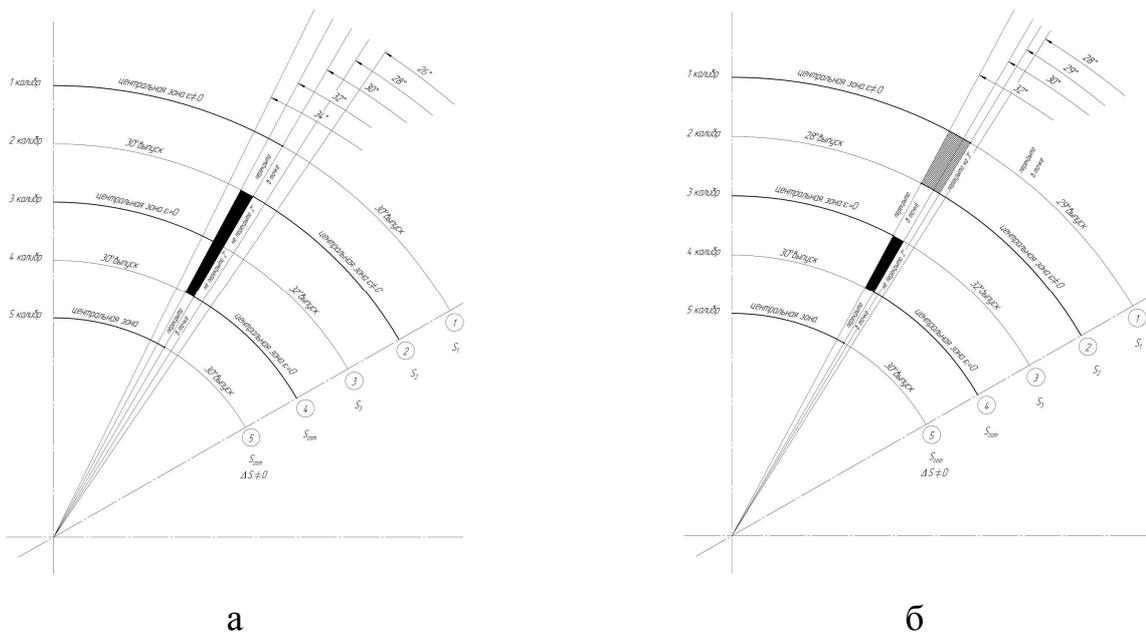


Рисунок 38 – Схема к анализу параметра $\varphi_{оз} / \varphi_{вып}$ по клетям стана PQF с использованием различных СК: а – 190, 290 мм; б - 265 мм

На рисунке 39 приведен график распределения значений коэффициента M [68] по периметру очага деформации при прокатке труб наружным диаметром 168 мм, с толщиной стенки 8,9 мм с использованием СК стана PQF 190 мм (аналогично для СК: 241, 265, 290 мм). Коэффициент M характеризует неравномерность распределения коэффициентов вытяжек (коэффициент K_μ) по периметру ОД и окружной скорости вала (коэффициент K_v) по периметру калибра с учётом геометрических параметров гильзы и раската по клетям НРС, что позволяет дать количественную оценку неравномерности деформации в ОД.

Коэффициент M рассчитывается по формуле:

$$M = K_v \cdot K_\mu.$$

Коэффициент, характеризующий неравномерность деформации по периметру ОД рассчитывается по формуле:

$$K_\mu = \frac{F_{i\alpha}}{F_{(i+1)\alpha}},$$

где $F_{i\alpha}$ – площадь участка ОД в i -ой клетке, ограниченного заданными углами (индекс α), рассчитываемая по разработанной ММ с учётом изменения зазора между валами.

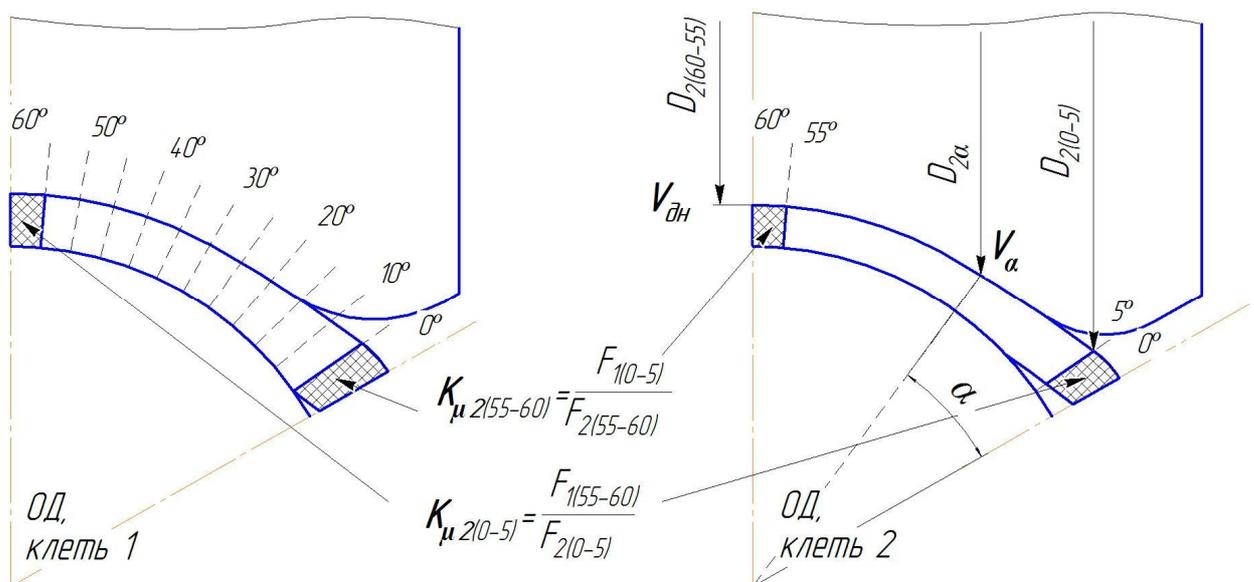


Рисунок 39 – Схема к расчёту коэффициента неравномерности деформаций M во второй клетке трёхвалкового стана

Коэффициент, характеризующий неравномерность окружной скорости валка по периметру калибра в i -ой клетки, рассчитывается по формуле:

$$K_v = V_\alpha / V_{\text{дн}},$$

где V_α – окружная скорость валка по периметру калибра в i -ой клетки (мм/сек), рассчитывается по формуле:

$$V_\alpha = \pi D_{i\alpha} n_i / 60,$$

$D_{i\alpha}$ – диаметр валка в i -ой клетки в зависимости от угла α , мм;

$V_{\text{дн}}$ – окружная скорость валка по дну калибра в i -ой клетки (мм/сек), рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{дн}} = \pi D_{\text{дн}} n_i / 60.$$

Из графика видно, что неравномерность деформации во второй клетки стана PQF значительно больше, чем в первой (рисунок 40; угол, равный 60° соответствует вершине калибра).

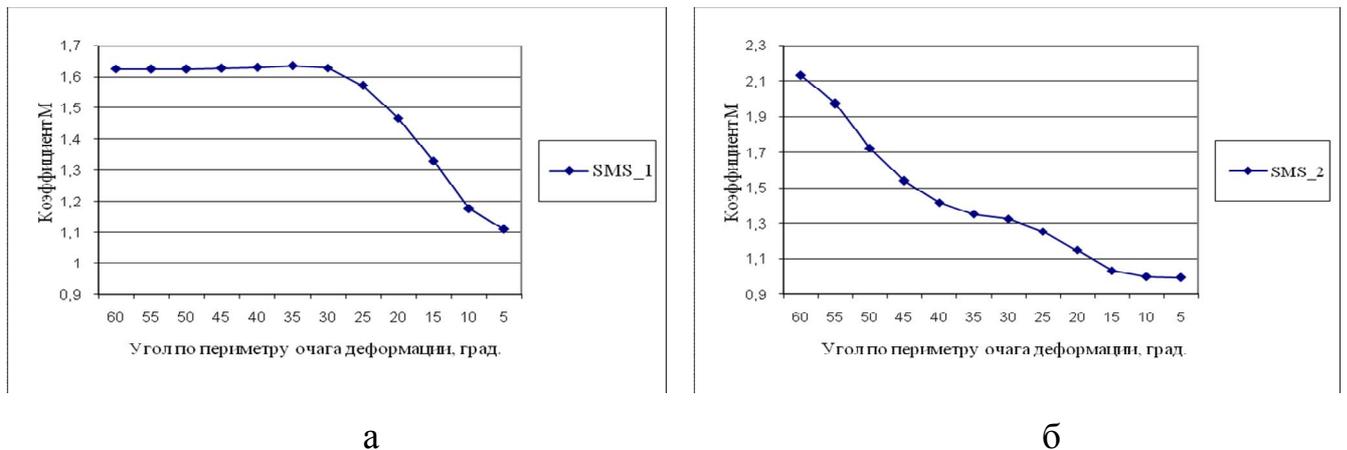


Рисунок 40 – Распределение значений коэффициента M по периметру обжимной и переходной зон калибра:

а - в первой клетки стана PQF, б – во второй клетки стана PQF

Совместные результаты исследований [68, 119, 120, 125, 126] показали, что распределение значений коэффициента M по периметру ОД позволяет производить количественную оценку неравномерности деформации, возникающей в теле раската при прокатке в калибрах с овальной или круглой обжимной зоной и выпусками, выполненными по радиусу. С ростом коэффициента M и ростом разницы между минимальным и максимальным

значением коэффициента M по периметру ОД наблюдается увеличение разности по величине знакопеременных напряжений. При повторной деформации металла с увеличением разности по величине знакопеременных напряжений (амплитуды) уменьшается технологическая пластичность [128-130]. Соответственно, снижение разности по величине знакопеременных напряжений по периметру ОД, показателей напряжённо-деформированного состояния раската, особенно при прокатке раската во второй [67-69] и последующих клетях, является благоприятным фактором, способствующим уменьшению вероятности возникновения разрывов по телу труб. Эти данные также согласуются с результатами настоящей работы.

Снизить показатель переполнения черновых калибров можно за счёт увеличения их овальности, однако, в этом случае при прокатке в последующих клетях коэффициент M увеличится, соответственно увеличится неравномерность деформации и снизится качество прокатываемых труб, поэтому при совершенствовании СК стана PQF необходимо учитывать множество факторов.

2.8 Разработка новой системы калибров стана PQF

При проектировании новых калибровок валков НРС с целью снижения различного вида дефектов, возникающих в процессе прокатки, уменьшения разнотолщинности стенки раската за НРС и как следствие на готовых трубах, необходимо учитывать следующие факторы:

- геометрические параметры калибра;
- показатель переполнения калибра металлом;
- равномерность распределения толщины стенки раската по периметру поперечного сечения очага деформации;
- обеспечение вытяжной способности калибра. То есть коэффициент вытяжки в i -ой клетки, при использовании нового калибра в процессе опытно-промышленных прокаток, должен быть сопоставим с коэффициентом вытяжки заменяемого калибра, в противном случае режим деформации в НРС может быть

нарушен, что приведёт к возникновению дефектов различного вида и увеличит риск возникновения аварийной ситуации;

- напряжённое состояние раската по периметру ОД.

При разработке новой калибровки валков для первых двух клетей стана PQF использовались следующие принципы построения:

1. Калибровка валков проектируется для случая прокатки тонкостенного сортамента;

$$2. \quad \varphi_{оз} / \varphi_{вып} > 1;$$

$$3. \quad \Delta B > 0;$$

4. Коэффициент вытяжки в i -ой клетке должен быть равен коэффициенту вытяжки при прокатке с использованием штатной СК SMS с учётом изменения зазора между валками:

$$\mu_{SMS\ i} = \mu_{NRD\ i};$$

5. Величины овальности калибра, радиусы галтелей равномерно снижаются по клетям в направлении хода прокатки;

6. Геометрические параметры нового калибра должны обеспечивать равномерное распределение значений коэффициента M по периметру ОД;

7. Геометрические параметры нового калибра должны обеспечивать уменьшение значения коэффициента M по вершине калибра относительно штатной калибровки валков:

$$M_{SMS\ вер\ i} > M_{NRD\ вер\ i};$$

8. После разработки калибра, отвечающего требованиям по п. 1-7, производится проверка полученных данных с использованием среды QForm (глава 3).

Общая схема по разработке новой калибровки валков стана PQF и проведению опытно-промышленных работ приведена на рисунке 41.

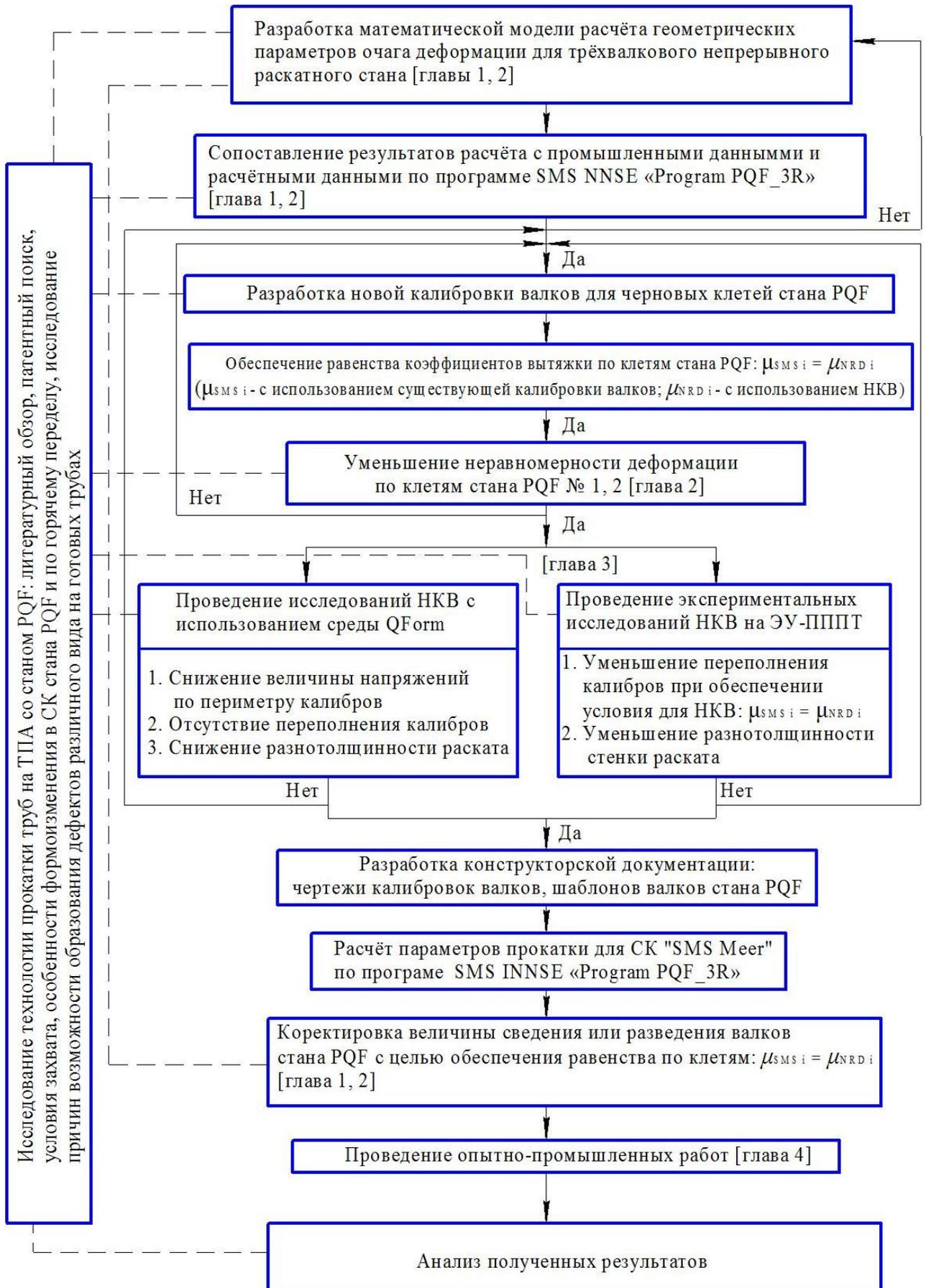


Рисунок 41 – Общая схема по разработке новой калибровки валков стана PQF и проведению опытно-промышленных работ

При расчёте параметров ОД с использованием шестигранных калибров, калибров с овальной обжимной зоной и выпуском, выполненным по радиусу, а также других видов калибров [137-146] заданного коэффициента вытяжки по клетям и уменьшения коэффициента M по вершине калибра, а также его равномерное распределение по периметру ОД, достигнуть не удалось.

Разработан новый калибр непрерывного раскатного стана (NRD), который выполнен по схеме: «радиус - прямая - круг - радиус выпуска» [126, 131]. Такой профиль калибра отвечает всем вышеперечисленным требованиям.

При использовании NRD происходит перераспределение истечения металла в ОД, а именно: увеличивается секундный объём металла истекающего в процессе прокатки в обжимной зоне ОД, соответствующей вершине калибра, за счёт использования обжимной зоны калибра, выполненной по схеме «радиус – прямая – круг» (рисунок 42, 43).

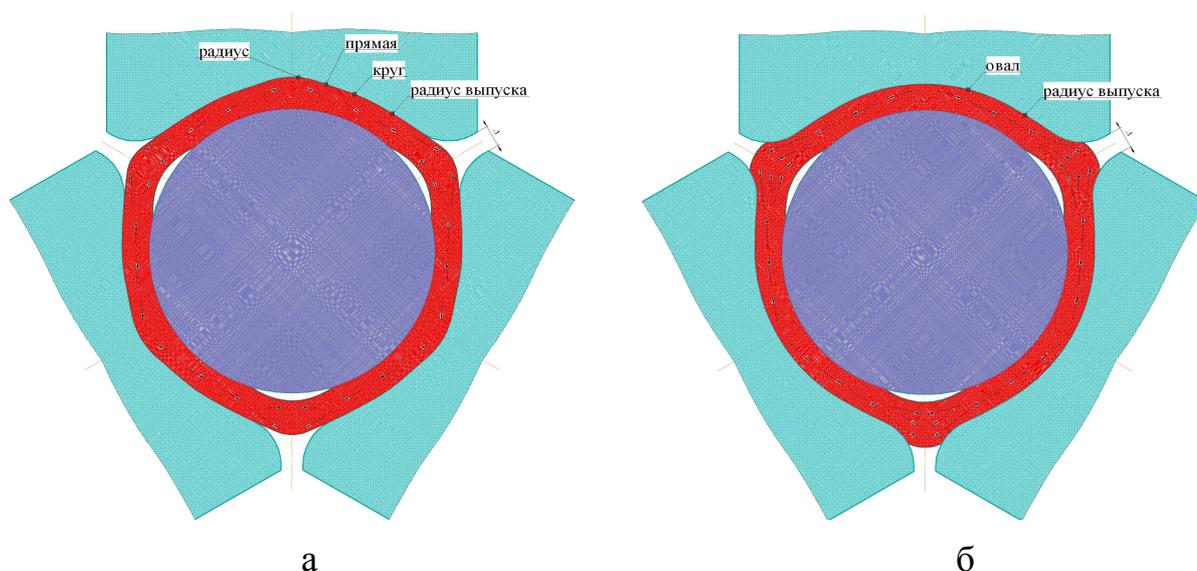


Рисунок 42 – Условный характер формоизменения раската в поперечном сечении ОД при прокатке: а – с использованием калибра NRD; б – с использованием калибра второго вида

Основное отличие калибра NRD от калибров 2-го, 3-го вида заключается в том, что зоны наибольшего обжатия толщины стенки раската располагаются симметрично относительно оси валка (перпендикулярной оси вращения валка), а по вершинам калибра обжатие толщины стенки раската имеет меньшее значение.

Наиболее равномерное распределение коэффициента M по периметру ОД второй клетки стана PQF наблюдается с использованием NRD в первой и второй клетях. На рисунке 44 приведен график распределения значений коэффициента M по периметру обжимной и переходной зон ОД при прокатке труб наружным диаметром 168,0 мм, с толщиной стенки 8,9 мм с использованием СК стана PQF 190 мм.

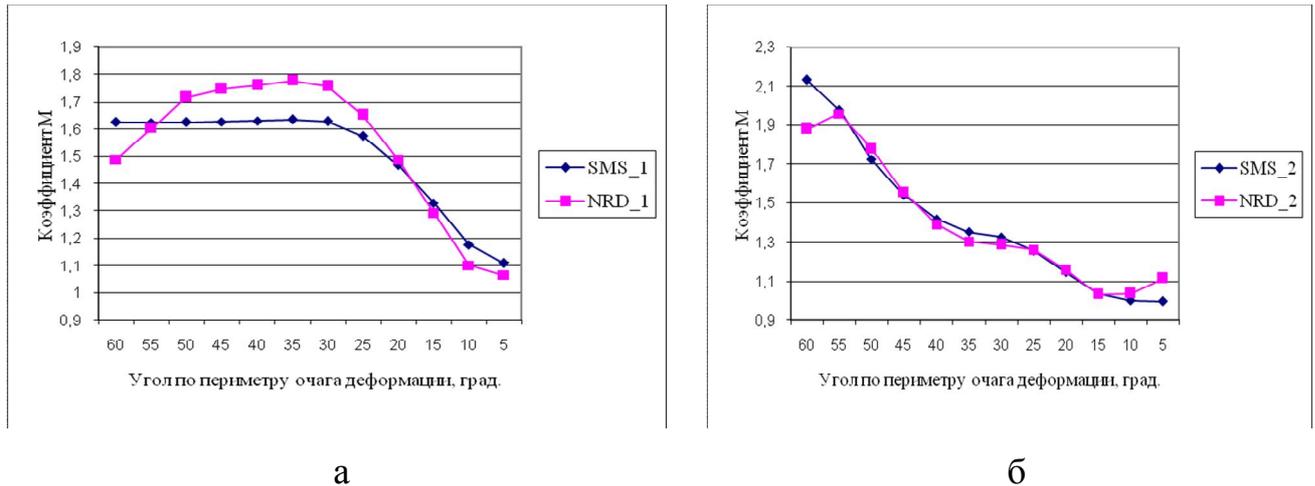


Рисунок 44 – График распределения коэффициента M по периметру (60° - вершина калибра) черновых клетей СК 190 мм стана PQF при прокатке труб: а - для первой клетки, б – для второй клетки

При разработке новой калибровки валков для 3, 4, 5 клетей стана PQF СК 190, 265 мм использовались следующие принципы построения:

1. $\varphi_{оз} / \varphi_{вып} > 1$;
3. Величины овальности калибра, радиусы галтелей равномерно снижаются по клетям в направлении хода прокатки.

Чертежи новой калибровки валков приведены в Приложениях Б, В.

2.9 Выводы по главе

1. Разработана математическая модель расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке труб в трёхвалковом непрерывном раскатном стане, учитывающая изменение зазора между валками и возможность осуществления расчёта для различных видов калибров. Проведена экспериментальная проверка расчётных данных в промышленных условиях, а

также с использованием средств компьютерного моделирования, погрешность не превышала 4,05%.

2. Показано, что полученные аналитические зависимости возможно эффективно использовать при расчёте режимов деформации и энергосиловых параметров процесса прокатки труб в трёхвалковых калибрах, как на оправке, так и без оправки. При этом полученные аналитические зависимости могут быть использованы в режиме реального времени в случае необходимости проведения оперативных расчетов различных параметров процесса прокатки в трёхвалковых калибрах на оправке в производственных условиях. В этом заключается их преимущество перед программными комплексами типа Deform, QForm.

3. С использованием методов статистической обработки данных исследован характер формоизменения раската по линии ТПА со станом PQF. Произведена оценка технологии, установлена и численно отражена взаимосвязь между характеристиками точности раската по горячему переделу и характеристиками точности готовых труб. Проведено исследование формоизменения раската по клетям стана PQF, определено, что при прокатке в первой и второй клетях имеется переполнение калибров металлом и наблюдается максимальная неравномерность деформаций по периметру калибров. Установлено, что при прокатке во всех клетях стана PQF толщина стенки по выпуску калибра утоняется.

4. На основании результатов исследований и разработанной математической модели расчёта геометрических параметров очага деформации была спроектирована новая калибровка валков для черновых клетей стана PQF, использование которой позволяет уменьшить коэффициент неравномерности деформации по вершине калибра на 15%. Также усовершенствована калибровка валков чистовых клетей, позволяющая уменьшить разнотолщинность стенки прокатываемых труб.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

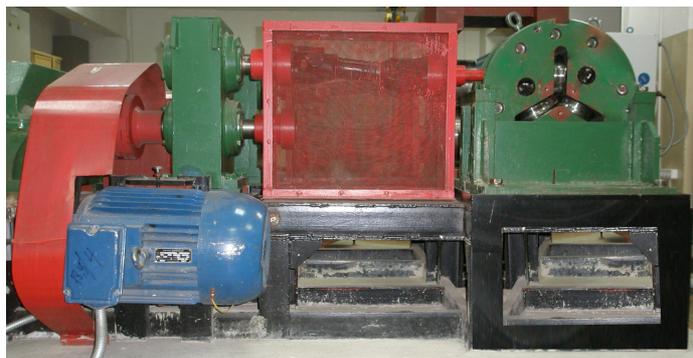
3.1 Постановка задач экспериментального исследования

Качественная и количественная оценка параметров формоизменения, характеристик точности, показателей напряжённого состояния раската при прокатке в системе калибров на оправке с использованием различной калибровки валков на основании экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях, а также результатов расчёта, полученных с применением современных средств компьютерного моделирования процесса прокатки, позволит определить какая из систем калибров НРС в большей степени способствует получению труб с наименьшей разнотолщиной стенки и с наименьшим количеством дефектов поверхности прокатного происхождения (например, дефект вида «скворечник»).

3.2 Физическое моделирование процесса продольной прокатки труб с использованием нового калибра непрерывного раскатного стана

3.2.1 Оборудование для физического моделирования

Лабораторные исследования проводились на универсальном комплексе оборудования для исследования процессов продольной прокатки труб (ЭУ–ПППТ), установленном в ОАО «РосНИТИ». ЭУ-ПППТ представляет из себя раму сварной конструкции со смонтированными на ней исполнительным устройством и приводом. В качестве исполнительных устройств могут быть использованы как трехвалковые, так и двухвалковые прокатные клетки (рисунок 45). Коэффициент моделирования для технологии PQF ПАО «ТАГМЕТ» составляет 0,167, поэтому при прокатке патрубков на ЭУ-ПППТ целесообразно использовать сурьмянистый свинец, так как он является подходящим модельным материалом для нагретой стали [155] и исключает влияние фактора неравномерного распределения температуры по телу патрубков на результат эксперимента.



а



б

Рисунок 45 – Общий вид ЭУ-ПППТ:

а – с трёхвалковыми клетями ($D_B=170$); б - с двухвалковыми клетями ($D_B=260$)

Двухвалковая клеть ЭУ-ПППТ представляет собой классическую конструкцию со станиной закрытого типа, со стационарными нижним валковым узлом и подвижными верхним валковым узлом. Осевая регулировка калибров осуществляется с высокой точностью за счёт точного позиционирования верхних рабочих валков относительно нижних.

Для визуализации на центральном пульте управления (+AD1) установлена многофункциональная операторская панель MAC-E410 с сенсорным экраном фирмы Mitsubishi Electric, Япония. С панели осуществляется цифровое задание частоты вращения каждого привода, также организовано рабочее место на базе персонального компьютера с программным обеспечением WinCC Flexible RT.

Экспериментальные исследования при прокатке патрубков на цилиндрической оправке с использованием различной калибровки валков были проведены с применением двухвалковых калибров. По результатам эксперимента осуществлялась качественная и количественная оценка параметров формоизменения и характеристик точности раската после прокатки с использованием различных систем калибров.

3.2.2 Проведение исследований и анализ результатов

Для прокатки использовались свинцовые патрубки наружным диаметром $36,97 \pm 0,08$ мм, с толщиной стенки $3,75 \pm 0,05$ мм. Патрубки изготавливались из

литой свинцовой заготовки. Под необходимый размер литые заготовки обтачивались и растачивались на токарном станке. Прокатка патрубков в калибрах осуществлялась на цилиндрической плавающей оправке диаметром $28,30 \pm 0,1$ мм, с частотой вращения валков 5,0 об/мин.

Параметры прокатки патрубков (раската) и калибровки валков с использованием различных систем калибров приведены в таблице 14. Калибровка валков проектировалась с учётом пунктов, приведенных в параграфах 2.7, 2.8, чертежи приведены в Приложении Г.

Таблица 14 – Параметры прокатки патрубков и калибровки валков

№ прохода	СК ОВР			СК NRD			Величина овальности калибра
	Калибр/маркировка	$\varphi_{оз} / \varphi_{вып}$	μ	Калибр/маркировка	$\varphi_{оз} / \varphi_{вып}$	μ	
1	Калибр 2 вида/СЛ1-30	1	1,29-1,59	NRD/ЗК1-30	1,18	1,34-1,53	1,30
2	Калибр 2 вида/СЛ2-18	1	1,27-1,34	NRD/ЗК2-18	1,5	1,26-1,51	1,18
3		1	1,06-1,15	Калибр 2 вида/СЛ2-18	1	1,14-1,37	1,18
4		1	1,05-1,11		1	1,14-1,32	1,18

Зазор между валками контролировался при помощи набора щупов. Перед прокаткой на внутреннюю поверхность патрубка наносилась смазка (Литол-24). После каждого прохода от раската отрезались раздутые передние и задние концы (рисунок 46).



Рисунок 46 – Фотография раската после первого прохода в СК ОВР

Площадь поперечного сечения очага деформации и геометрические параметры раската после каждого прохода рассчитывалась по методике, приведенной в параграфе 2.3. Результаты измерений толщины стенки раската после проходов № 1-32 представлены в таблицах 15, 16, курсивом выделены значения толщин стенок, соответствующих вершине калибра, полужирным цветом выделены толщины стенок, соответствующих выпуску калибра.

Таблица 15 – Толщина стенки по периметру поперечного сечения ОД после прокатки с использованием СК ОВР

Угол, ° (0°-вершина)	Толщина стенки раската, мм/№ раската				Угол, ° (0°-вершина)	Толщина стенки раската, мм/№ раската			
	№1	№2	№3	№4		№5	№6	№7	№8
0	1,280	1,170	1,080	1,140	0	1,300	1,325	0,869	1,052
45	1,790	1,770	1,720	1,760	45	1,794	1,659	1,444	1,450
90	4,520	1,520	1,430	1,140	90	4,261	1,940	1,316	0,871
135	1,840	1,790	1,780	1,730	135	2,009	1,821	1,671	1,308
180	1,360	1,200	1,170	1,060	180	1,336	1,258	1,062	1,026
225	1,950	1,590	1,560	1,530	225	1,745	1,315	1,470	1,625
270	4,460	0,920	0,860	0,950	270	4,217	1,142	1,416	1,269
315	1,890	1,670	1,590	1,540	315	1,838	1,484	1,500	1,642
Угол, ° (0°-вершина)	Толщина стенки раската, мм/№ раската				Угол, ° (0°-вершина)	Толщина стенки раската, мм/№ раската			
	№9	№10	№11	№12		№13	№14	№15	№16
0	1,40	1,41	1,19	1,11	0	1,39	1,09	1,20	1,08
45	2,05	1,98	1,54	1,49	45	2,55	1,81	1,65	1,65
90	4,22	1,72	1,23	1,06	90	4,28	1,39	1,31	1,24
135	2,20	2,02	1,72	1,53	135	2,19	1,93	1,58	1,61
180	1,38	1,29	1,07	1,07	180	1,41	1,21	1,05	1,12
225	2,23	1,67	1,54	1,66	225	2,52	1,91	1,74	1,58
270	4,21	1,26	1,46	1,19	270	4,26	1,46	1,44	1,11
315	2,11	1,82	1,80	1,63	315	2,51	1,90	1,68	1,52

Таблица 16 – Толщина стенки по периметру поперечного сечения ОД после прокатки с использованием СК NRD

Угол, ° (0°-вершина)	Толщина стенки раската, мм/№ раската				Угол, ° (0°-вершина)	Толщина стенки раската, мм/№ раската			
	№17	№18	№19	№20		№21	№22	№23	№24
0	2,100	1,680	1,100	1,000	0	2,122	1,676	1,196	1,124
45	1,840	1,610	1,520	1,400	45	1,892	1,426	1,447	1,308
90	4,280	2,230	1,690	1,160	90	4,651	2,285	1,770	1,125
135	1,910	1,520	1,550	1,380	135	1,876	1,743	1,665	1,385
180	2,180	1,640	1,180	1,010	180	2,177	1,803	1,124	1,179
225	2,130	1,740	1,370	1,190	225	1,959	1,621	1,315	1,509
270	4,270	2,250	1,500	1,280	270	4,798	2,266	1,875	1,146
315	1,680	1,490	1,390	1,420	315	1,728	1,367	1,526	1,393
Угол, ° (0°-вершина)	Толщина стенки раската/№ раската				Угол, ° (0°-вершина)	Толщина стенки раската/№ раската			
	№25	№26	№27	№28		№29	№30	№31	№32
0	2,217	1,860	1,158	1,164	0	2,213	1,639	1,093	1,057
45	1,854	1,544	1,459	1,472	45	1,965	1,452	1,474	1,397
90	4,613	2,233	2,000	1,207	90	4,691	2,295	1,980	1,243
135	1,840	1,732	1,537	1,437	135	1,807	1,761	1,461	1,359
180	2,170	1,724	1,101	1,158	180	2,057	1,812	1,088	1,043
225	1,886	1,626	1,498	1,447	225	1,871	1,499	1,455	1,347
270	4,987	2,323	1,836	1,122	270	4,474	2,301	1,849	1,115
315	1,800	1,620	1,593	1,401	315	1,745	1,496	1,376	1,399

Параметры прокатки, характеристики точности раската для каждого прохода представлены в таблицах 17, 18.

Показатель переполнения калибра рассчитывается по формуле:

$$B_{\%} = \frac{B_{pn} - B_{pф}}{B_{pn}} \cdot 100\%,$$

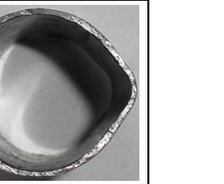
Относительная разнотолщинность стенки раската по результатам физического моделирования процесса прокатки, рассчитывается по формуле:

$$S_{\%} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{cp}} \cdot 100\%.$$

Таблица 17 - Параметры прокатки и характеристики точности раската после прокатки с использованием различных систем калибров

СК	Номер прохода	Зазор между валками, мм	Площадь поперечного сечения ОД раската после прохода, мм ²	Коэф. вытяжки	σ_s^2	S _{ср} , мм	Абсолютная разнотолщинность стенки, мм	V _{рп} , мм	V _{рф} , мм	ΔB, мм	D _{ср} , мм	D _{ср} /S _{ср}	Относительная разнотолщинность стенки, %	V _% , %
ОВР	1	2,40	276,80	1,42	1,53	2,39	3,24	39,70	40,40	-0,70	33,89	14,20	135,78	-1,76
	2	2,75	206,78	1,34	0,09	1,45	0,87	35,56	38,69	-3,13	33,12	22,78	59,85	-8,80
	3	2,65	180,00	1,15	0,09	1,40	0,92	35,55	38,81	-3,26	33,14	23,69	65,77	-9,17
	4	2,65	163,30	1,10	0,09	1,36	0,81	35,55	38,21	-2,66	33,14	24,44	59,72	-7,48
	1	2,40	249,17	1,59	1,29	2,31	2,96	39,70	39,97	-0,27	33,96	14,68	128,04	-0,68
	2	2,80	195,93	1,27	0,07	1,49	0,80	35,60	40,06	-4,46	34,28	22,96	53,45	-12,53
	3	2,80	185,36	1,06	0,06	1,34	0,80	35,60	43,00	-7,40	34,15	25,41	59,69	-20,79
	4	2,80	167,70	1,11	0,07	1,28	0,77	35,60	37,18	-1,58	32,86	25,67	60,22	-4,44
	1	2,50	274,20	1,42	1,11	2,48	2,84	39,76	39,60	0,16	34,08	13,77	114,82	0,40
	2	2,80	208,07	1,32	0,08	1,65	0,75	35,60	40,14	-4,54	33,91	20,61	45,83	-12,75
	3	2,80	181,86	1,14	0,06	1,44	0,73	35,60	41,20	-5,60	33,74	23,38	50,52	-15,73
	4	2,80	173,00	1,05	0,06	1,34	0,60	35,60	37,51	-1,91	33,03	24,60	44,68	-5,37
	1	2,60	302,06	1,29	1,08	2,64	2,89	39,84	39,87	-0,03	34,21	12,97	109,63	-0,08
	2	2,80	225,79	1,34	0,10	1,59	0,84	35,60	40,04	-4,44	33,78	21,28	52,91	-12,47
	3	2,80	201,34	1,12	0,05	1,46	0,69	35,60	40,65	-5,05	33,66	23,11	47,45	-14,19
	4	2,80	188,34	1,07	0,05	1,36	0,57	35,60	37,84	-2,24	33,47	24,52	41,69	-6,29
NRD	1	2,40	251,50	1,53	1,02	2,55	2,60	39,70	39,80	-0,10	34,36	13,48	102,01	-0,25
	2	2,75	199,60	1,26	0,08	1,77	0,76	35,56	35,64	-0,08	32,30	18,25	42,94	-0,22
	3	2,65	145,75	1,37	0,03	1,41	0,59	35,55	35,74	-0,19	32,45	22,97	41,77	-0,53
	4	2,65	110,13	1,32	0,02	1,23	0,42	35,55	35,50	0,05	32,17	26,15	34,15	0,14
	1	2,40	259,73	1,51	1,45	2,65	3,07	39,70	39,88	-0,18	34,54	13,03	115,83	-0,45
	2	2,80	185,02	1,40	0,10	1,77	0,92	35,60	35,50	0,10	32,76	18,47	51,77	0,28
	3	2,80	155,15	1,19	0,06	1,49	0,75	35,60	35,45	0,15	32,45	21,78	50,41	0,42
	4	2,80	130,62	1,19	0,02	1,27	0,39	35,60	35,41	0,19	32,32	25,42	30,29	0,53
	1	2,50	275,36	1,42	1,54	2,67	3,19	39,76	39,74	0,02	34,24	12,82	119,32	0,05
	2	2,80	192,71	1,43	0,07	1,83	0,78	35,60	35,76	-0,16	32,83	17,91	42,50	-0,45
	3	2,80	163,00	1,18	0,08	1,52	0,90	35,60	35,63	-0,03	32,33	21,23	59,04	-0,08
	4	2,80	141,35	1,15	0,02	1,30	0,35	35,60	35,14	0,46	32,38	24,89	26,90	1,29
	1	2,60	293,20	1,34	1,33	2,60	2,95	39,84	39,77	0,07	34,24	13,15	113,18	0,18
	2	2,80	194,80	1,51	0,10	1,78	0,85	35,60	35,46	0,14	32,70	18,35	47,65	0,39
	3	2,80	170,18	1,14	0,09	1,47	0,89	35,60	36,93	-1,33	32,90	22,35	60,60	-3,74
	4	2,80	149,28	1,14	0,02	1,25	0,36	35,60	34,84	0,76	32,10	25,78	28,59	2,13

Таблица 18 – Сводная таблица результатов эксперимента на основании данных таблицы 17

СК		ОВР				NRD			
№ прохода		1	2	3	4	1	2	3	4
Фото* поперечного сечения раската									
μ		1,29-1,59	1,27-1,34	1,06-1,15	1,05-1,11	1,34-1,53	1,26-1,51	1,14-1,37	1,14-1,32
$S\%$	max	135,78	59,85	65,77	60,22	119,32	51,77	60,6	34,50
	min	109,63	45,83	47,45	41,69	102,01	42,94	41,77	26,90
σ_s^2	max	1,53	0,10	0,09	0,09	1,54	0,1	0,09	0,02
	min	1,08	0,07	0,05	0,05	1,02	0,07	0,03	0,02
$B\%$	max	0,4	-8,8	-9,17	-4,44	0,18	0,39	0,42	2,13
	min	-1,76	-12,75	-20,79	-7,48	-0,45	-0,45	-3,74	0,14

* - в таблице представлены фотографии поперечного сечения раскатов №5-8, №21-24 после проходов в СК ОВР и NRD соответственно (таблицы 15, 16).

После первого прохода в СК ОВР при заданном диапазоне коэффициента вытяжки величина $V\%$ не превышала $-1,76\%$, после последующих проходов наблюдалось значительное переполнение калибров, в деформации были задействованы галтели валков. Вследствие наличия значительной неравномерности деформации при прокатке с использованием СК ОВР относительная разнотолщинность стенки раската после четвёртого прохода превышала $41,69\%$ (чистой калибр).

Использование нового калибра NRD в первых двух проходах позволило снизить показатель переполнения калибров для второго прохода не менее чем в 20 раз, для третьего не менее чем в 2 раза. Характеристики точности раската $S\%$ и σ_s^2 после прокатки в калибрах СК NRD для всех проходов имели меньшие значения, чем при прокатке в калибрах СК ОВР. После четвёртого прохода в СК NRD характеристики точности раската $S\%$ и σ_s^2 имели меньшие значения в 1,55 и 2,5 раза соответственно, чем при прокатке в СК ОВР.

Уменьшение неравномерности деформаций при прокатке в новом калибре также объясняется более равномерным истечением металла в продольном направлении (рисунок 47). Соответственно, ожидается, что использование нового калибра в промышленных условиях, также позволит уменьшить величину концевой обрезки.



Рисунок 47 - Характер истечения металла после первого прохода (ПК, вид сверху на обжимную зону калибра) с использованием калибров: ОВР (вид слева) и NRD

3.3 Компьютерное моделирование процесса прокатки труб в трёхвалковых калибрах

3.3.1. Показатели напряжённо-деформированного состояния

В качестве оценки напряжений, возникающих в процессе раскатки гильз в трёхвалковых НРС, использованы показатели напряжённо-деформированного состояния [60, 88, 134], рассчитываемые в конечно-элементной компьютерной программе QForm-3D:

1. Среднее напряжение, МПа;
2. Величина размаха амплитуды средних нормальных напряжений, МПа;
3. Продольные напряжения, МПа;
4. Величина размаха амплитуды продольных напряжений, МПа;
5. Показатель σ/τ , вычисляемый по формуле

$$k = \frac{\sigma}{\tau},$$

где $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ - среднее напряжение, МПа;

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad - \quad \text{интенсивность касательных}$$

напряжений, МПа;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения, МПа.

6. Показатель Кокрофта – Латама:

$$C_{К-Л} = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon,$$

σ_1 – главное максимальное растягивающее напряжение, МПа;

$d\varepsilon$ – приращение накопленных деформаций;

$\sigma_i = \sqrt{3} \cdot \tau$ – интенсивность нормальных напряжений, МПа.

В практике расчетов в нашей стране наибольшее распространение получили методики оценки поврежденности металла В. Л. Колмогорова [134] и А. А. Богатова [124]. В работах [60, 88] для расчётов широко используется критерий Кокрофта-Латама, причём в работе [60] показана высокая сходимость

результатов расчёта повреждённости металла с методикой [124]. В работе [88] определены предельные значения C_{K-L} при совместном использовании результатов, полученных при проведении компьютерного моделирования в среде Deform и физического моделирования на комплексе Gleeble-3800 процесса прокатки на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 2000. Показатель Кокрофта – Латама в данной главе приведен для справки, возможность и целесообразность оценки процесса прокатки в трёхвалковых НРС с использованием данного показателя требует дополнительных исследований.

Следует отметить, что предельные значения показателей напряжённо-деформированного состояния раската для процесса продольной прокатки на трёхвалковом НРС в настоящее время не определены.

3.3.2 Компьютерное моделирование процесса прокатки труб с использованием различных систем калибров стана PQF 190 мм

Моделирование технологии прокатки труб наружным диаметром 168,3 мм, с толщиной стенки 8,9 мм с использованием СК стана PQF 190 мм проводилось в среде QForm (таблица 19):

- с использованием новой СК NRD;
- с использованием существующей СК SMS.

Геометрические параметры калибровки валков СК SMS и NRD приведены в Приложениях Б, В.

Таблица 19 - Система калибров NRD

Система калибров	№ клетки	Калибровка валков	Вид калибра	$\varphi_{оз} / \varphi_{вып}$	Овальность	Эксцентриситет, мм
СК NRD	1	Приложение Б	NRD	0,88	1,150	0,00
	2		NRD	1,14	1,118	0,00
	3	Приложение В	круг – радиусный выпуск	1,14	1,110	0,00
	4			1,31	1,090	0,00
	5			1,31	1,090	0,00

Исходные данные для моделирования технологии прокатки на стане PQF в среде QForm, приведены в таблицах 20, 21.

Коэффициент трения: «раскат-валок» принимался равным 0,4; «раскат-оправка» - 0,1.

Таблица 20 – Исходные данные для моделирования технологии прокатки на стане PQF

Исходные данные		
Название	Обозначение	Величина
Диаметр гильзы, мм	D_g , мм	222
Толщина стенки гильзы, мм	S_g , мм	19,82
Скорость гильзы, мм/с	V_g , мм/с	1687,8
Температура гильзы, °C	T , °C	1100
Диаметр оправки, мм	D_o , мм	172,35
Скорость удержания оправки, мм/с	V_o , мм/с	1080
Скорость выхода раската за 5 клетью стана PQF, мм/с	$V_{\text{вых}}$, мм/с	4450
Расстояние между первой и второй клетью стана PQF, мм	G1-G2	1050
Расстояние между второй и третьей клетью стана PQF, мм	G2-G3	1580
Расстояние между третьей и четвертой клетью стана PQF, мм	G3-G4	1050
Расстояние между четвертой и пятой клетью стана PQF, мм	G4-G5	1050
Марка стали	32Г2А/К55	

Таблица 21 – Данные для моделирования

№ клетки	Коэффициент вытяжки по «Program PQF_3R»	Обороты валков, об/мин	Идеальный диаметр валков, мм	Коэффициент вытяжки по «Program PQF_3R»	Обороты валков, об/мин	Идеальный диаметр валков, мм
NRD			SMS			
G1	1,399	68,39	805	1,399	69,6	805
G2	1,362	90,58	845	1,362	93,3	845
G3	1,231	120,57	795	1,231	122,75	795
G4	1,104	154,22	720	1,104	154,53	720
G5	1,018	162,22	715	1,018	162,17	715

В таблице 21 приведены данные для моделирования в среде QForm в соответствии с результатами расчёта по «Program PQF_3R».

Обработка результатов моделирования осуществлялась с использованием трассирующих точек (рисунки 48-51; таблица 22-24), по которым регистрировались максимальные значения показателей напряжённо-деформированного состояния раската при прокатке в СК SMS и NRD. Трассирующая точка №1 соответствует вершине калибра для всех ОД. Например, трассирующая точка №1 для первой клетки соответствует отслеживаемому маршруту: «G1: точка №1 – G2: точка №5 – G3: точка №1 – G4: точка №5 – G5: точка №1».

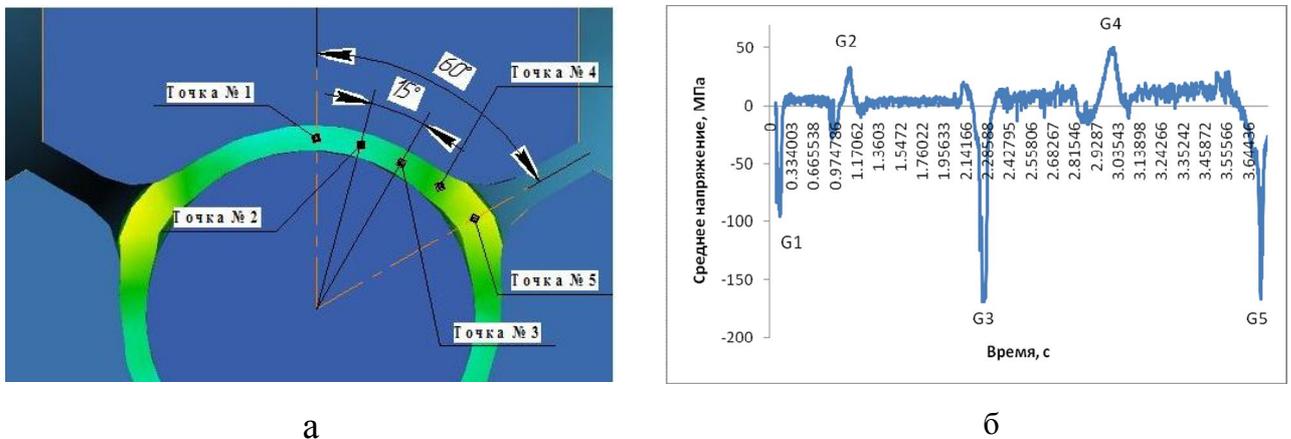


Рисунок 48 – К анализу напряжённо-деформированного состояния раската:
 а – расположение трассирующих точек по периметру ОД; б – распределение средних напряжений в процессе прокатки для трассирующей точки №1

Таблица 22 – Показатели напряжённо-деформированного состояния раската по результатам моделирования в среде QForm

№ клетки	№ точки	Средние напряжения, МПа	Продольные напряжения, МПа	Интенсивность касательных напряжений, МПа	Показатель Кокрофта-Латама	Величина размаха амплитуды средних напряжений, МПа	Величина размаха амплитуды продольных напряжений, МПа	σ/τ
СК SMS								
1	1	-96,35	-116,13	104,77	0,01			-0,92
	2	-86,28	-85,04	104,36	0,00			-0,83
	3	-66,51	-93,57	101,83	0,03			-0,65
	4	-43,79	-53,34	97,17	0,14			-0,45
	5	8,80	66,64	95,20	0,23			0,09
2	1	-142,31	-106,10	116,40	0,24	151,11	172,74	-1,22
	2	-118,67	-70,20	121,49	0,20	162,46	123,54	-0,98
	3	-77,89	35,05	127,95	0,12	144,40	128,62	-0,61
	4	19,04	96,00	127,45	0,22	105,32	181,04	0,15
	5	32,54	115,30	128,43	0,27	128,89	231,43	0,25
3	1	-169,32	-135,87	142,49	0,29	201,86	251,17	-1,19
	2	-160,10	-112,47	145,57	0,25	179,14	208,47	-1,10
	3	-122,29	-41,84	155,36	0,19	200,18	76,53	-0,79
	4	23,45	114,74	142,92	0,38	142,12	184,94	0,16
	5	43,77	138,40	144,83	0,43	186,08	244,50	0,30
4	1	-186,85	-144,07	161,64	0,44	230,62	282,47	-1,16
	2	-179,45	-147,35	156,19	0,38	202,90	262,09	-1,15
	3	-72,61	65,53	158,72	0,29	194,90	107,37	-0,46
	4	44,69	136,77	141,74	0,37	204,79	249,24	0,32
	5	47,92	139,81	139,47	0,39	217,24	275,68	0,34
5	1	-166,83	-135,72	159,05	0,43	214,75	275,53	-1,05
	2	-177,13	-138,61	150,46	0,33	221,82	275,38	-1,18
	3	-212,78	-156,84	173,32	0,25	285,39	222,37	-1,23
	4	38,90	127,54	144,86	0,35	218,35	274,89	0,27
	5	50,61	134,30	131,45	0,52	237,46	278,37	0,39
СК NRD								
1	1	-172,77	-132,35	109,60	0,01			-1,58
	2	-140,98	-106,92	108,50	0,01			-1,30
	3	-122,36	-90,89	108,20	0,04			-1,13
	4	-89,39	-70,38	106,31	0,15			-0,84
	5	41,16	99,08	105,85	0,19			0,39
2	1	-125,13	-95,51	107,26	0,23	166,29	194,59	-1,17
	2	-99,30	-67,29	108,21	0,18	188,69	137,67	-0,92
	3	-54,62	38,06	109,83	0,10	176,98	128,95	-0,50
	4	25,37	85,84	108,17	0,22	166,35	192,76	0,23
	5	28,37	91,35	106,36	0,23	201,14	223,70	0,27
3	1	-161,4	-119,93	130,85	0,26	189,77	211,28	-1,23
	2	-160,89	-132,69	132,95	0,26	186,26	218,53	-1,21
	3	-134,8	-83,77	139,29	0,17	189,42	121,93	-0,97
	4	-30,27	-70,37	134,59	0,30	129,57	137,66	-0,22
	5	35,5	120,04	132,15	0,40	160,63	215,55	0,27
4	1	-183,12	-140,68	148,87	0,42	218,62	260,72	-1,23
	2	-149,69	-96,14	145,49	0,35	179,96	166,51	-1,03
	3	-23,79	85,90	142,94	0,20	158,59	169,67	-0,17
	4	39,19	123,94	131,20	0,44	200,08	256,63	0,30
	5	46,15	134,66	135,55	0,39	207,55	254,59	0,34
5	1	-155,40	-111,50	144,36	0,42	201,55	246,16	-1,08
	2	-162,46	-108,84	143,24	0,39	201,65	232,78	-1,13
	3	-229,20	-175,60	163,79	0,28	252,99	261,50	-1,40
	4	-106,57	-64,56	158,09	0,41	256,26	158,70	-0,67
	5	31,58	103,07	120,65	0,49	214,70	243,75	0,26

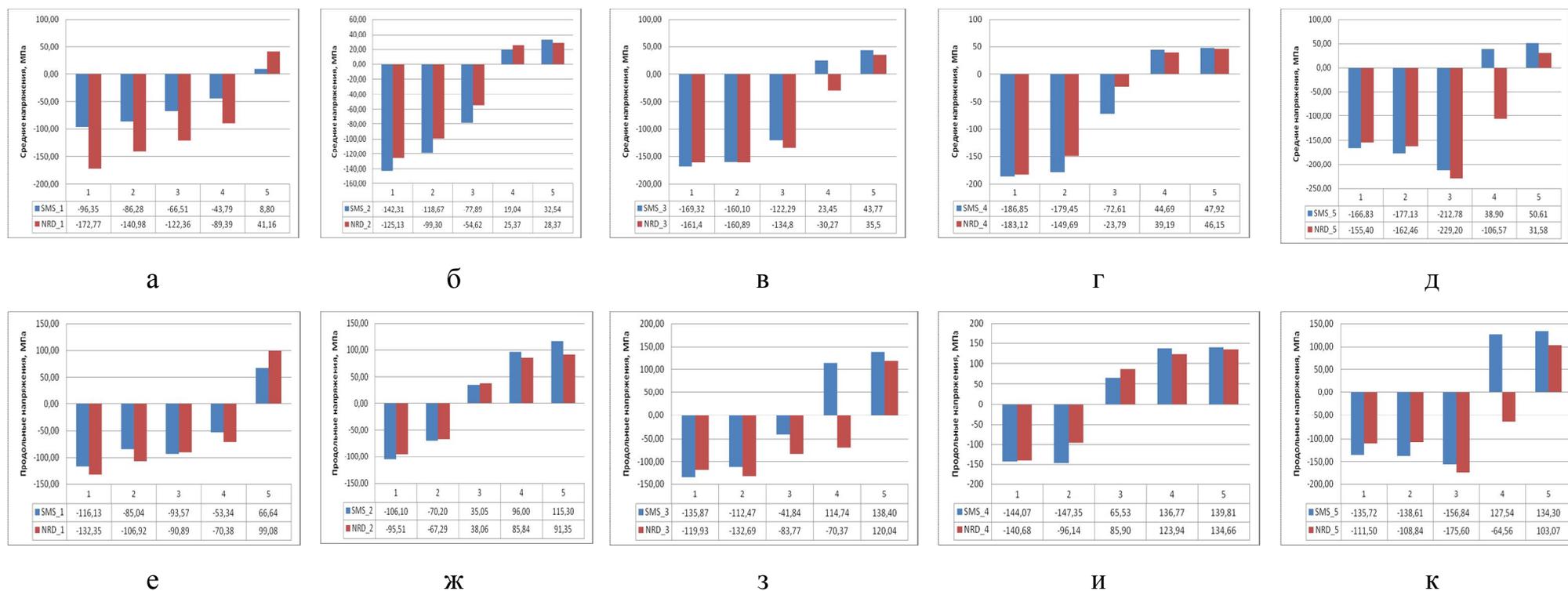


Рисунок 49 - Показатели напряженно-деформированного состояния раската по периметру ОД в клетях G1-G5 стана PQF с использованием СК SMS и NRD: а, б, в, г, д – средние напряжения; е, ж, з, и, к – продольные напряжения (по оси «х» - номер трассирующей точки)

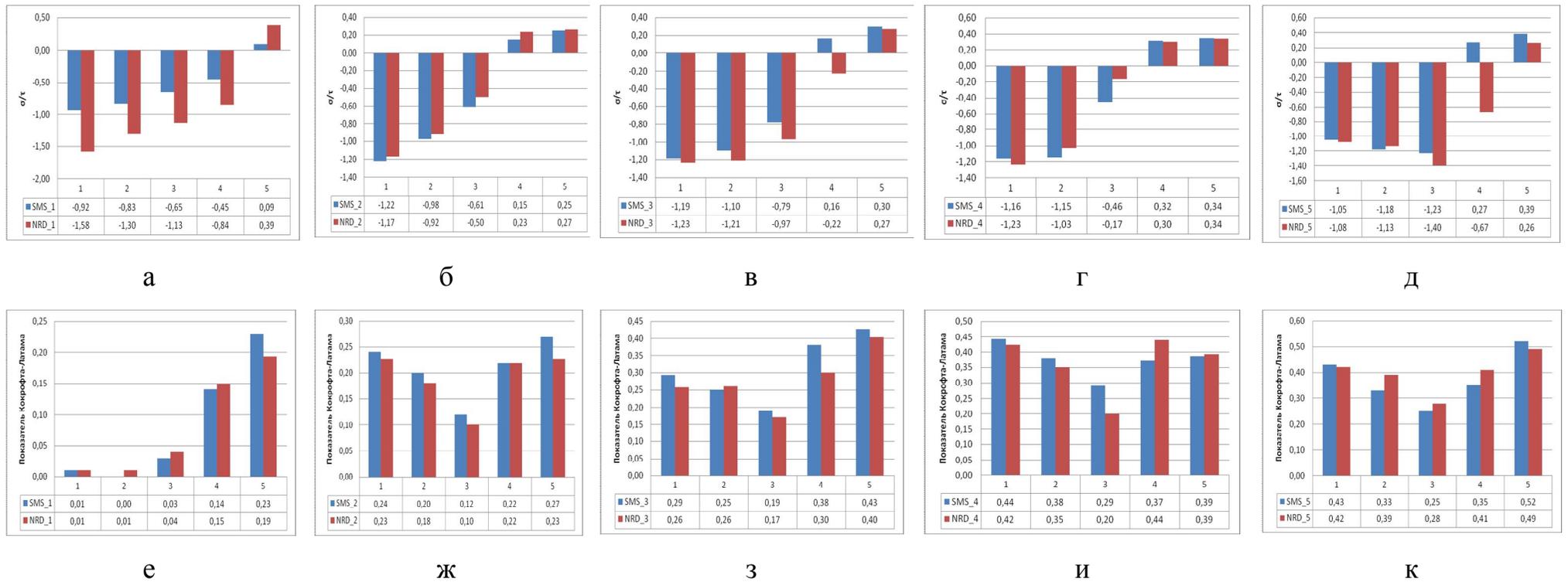


Рисунок 50 - Показатели напряженно-деформированного состояния раската по периметру ОД в клетях G1-G5 стана PQF с использованием СК SMS и NRD: а, б, в, г, д – показатель $\frac{\sigma}{\tau}$; е, ж, з, и, к – показатель Кокрофта – Латама (по оси «х» - номер трассирующей точки)

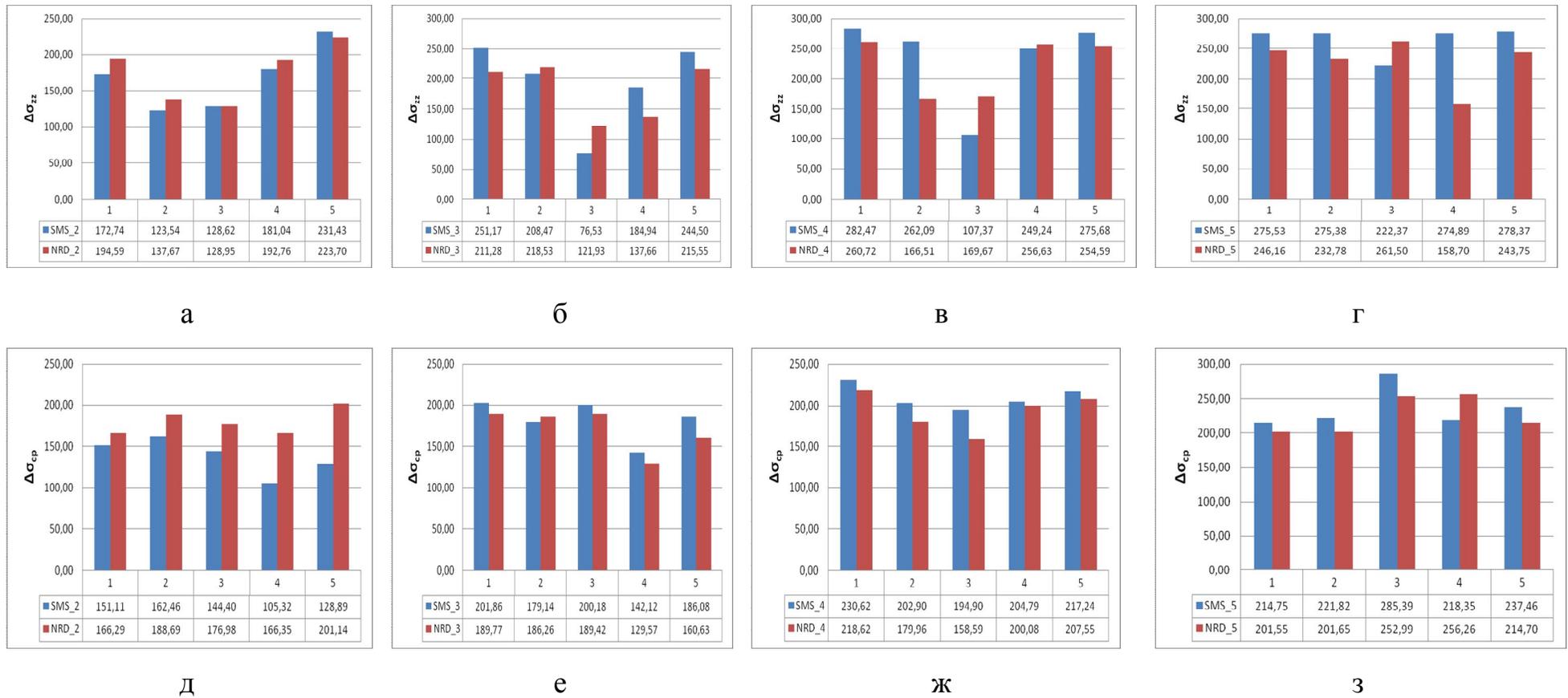


Рисунок 51 – Величина размаха амплитуды продольных (а, б, в, г) и средних напряжений (д, е, ж, з) в соответствии с заданными маршрутами трассирующих точек (по оси «х» - номер трассирующей точки)

Анализ результатов моделирования, приведенный на рисунках 48-51 и в таблицах 22-24, показал, что использование СК NRD имеет следующие преимущества перед СК SMS:

1. При прокатке во второй и последующих клетях наблюдается снижение средних и продольных напряжений, показателя Кокрофта – Латама (таблица 23).
2. Наблюдается более выраженная схема всестороннего неравномерного сжатия, которая способствует залечиванию микродефектов (трещин), возникающих в процессе прокатки.
3. Величина размаха амплитуды продольных и средних напряжений во второй и последующих клетях значительно ниже.

Таблица 23 – Снижение или увеличение показателей напряжённо-деформируемого состояния раската в ОД по клетям стана PQF при прокатке с использованием СК NRD относительно СК SMS

№ точки по периметру калибра	№ клетки, показатели напряжённо-деформируемого состояния раската (знак минус означает уменьшение показателя в % относительно значения СК SMS)														
	Клеть 1			Клеть 2			Клеть 3			Клеть 4			Клеть 5		
	σ , МПа	σ_{zz} , МПа	$C_{к-л}$	σ , МПа	σ_{zz} , МПа	$C_{к-л}$	σ , МПа	σ_{zz} , МПа	$C_{к-л}$	σ , МПа	σ_{zz} , МПа	$C_{к-л}$	σ , МПа	σ_{zz} , МПа	$C_{к-л}$
1	79,31	13,97	0,00	-12,07	-9,98	-5,42	-4,68	-11,73	-12,29	-2,00	-2,35	-4,51	-6,85	-17,85	-2,33
2	63,40	25,73	-	-16,32	-4,15	-10,00	0,49	17,98	4,00	-16,58	-34,75	-7,89	-8,28	-21,48	18,18
3	83,97	-2,86	33,33	-29,88	8,59	-16,67	10,23	100,22	-10,53	-67,24	31,08	-31,03	7,72	11,96	12,00
4	104,13	31,95	7,14	33,25	-10,58	0,00	-229,08	-161,33	-21,05	-12,31	-9,38	18,92	-373,96	-150,62	17,14
5	367,73	48,68	-16,09	-12,81	-20,77	-15,93	-18,89	-13,27	-5,62	-3,69	-3,68	1,55	-37,60	-23,25	-5,77

Таблица 24 – Распределение значений $C_{K-Л}$ по периметру калибров на выходе из очага деформации

№ клетки	Вершина/ выпуск	Система калибров				Шкала
		SMS Meer (значения $C_{K-Л}$)		NRD (значения $C_{K-Л}$)		
1	вершина	0,010		0,010		
	выпуск	0,230		0,193		
2	вершина	0,240		0,227		
	выпуск	0,270		0,227		
3	вершина	0,293		0,257		
	выпуск	0,427		0,403		
4	вершина	0,443		0,423		
	выпуск	0,387		0,393		
5	вершина	0,430		0,420		
	выпуск	0,520		0,490		

Как показано таблице 24 при прокатке труб с использованием СК NRD максимальные значения C_{K-L} по клетям стана ниже в сравнении с значениями для СК SMS, наибольшее снижение значения C_{K-L} зафиксировано в зоне выпуска калибра при прокатке во второй клетке СК NRD на 15,92% относительно СК SMS.

В таблице 25 приведены геометрические параметры раската в поперечном сечении ОД по клетям стана PQF при прокатке в СК SMS и NRD по данным результатов моделирования в среде QForm. В таблице 26 приведен характер поперечной разнотолщинности стенки в ОД по клетям стана PQF.

Анализ результатов таблицы 25 показывает, что при использовании СК NRD:

1. Абсолютная разнотолщинность стенки на выходе из стана PQF снижается в 1,7 раз, среднее квадратичное отклонение снижается в 1,78 раз, $S_{\%}$ в 1,66 раз;

2. Отсутствует переполнение калибров во всех клетях стана.

В таблице 27 приведены усилия на валки при установившемся процессе прокатки в соответствии с результатами компьютерного моделирования.

№ клетки	Усилие на валок, кН	
	СК SMS	СК NRD
1	1518	1418
2	1992	1870
3	1602	1647
4	1041	1168
5	629	582

Снижение усилий на валки с использованием СК NRD при прокатке в 1 и 2 клетях объясняется меньшим обжатием толщины стенки по вершине калибров и меньшим значением коэффициента M по периметру калибров. Увеличение усилий в клетях 3, 4 объясняется большим обжатием толщины стенки по вершине калибров, а также большим обжатием толщины стенки по периметру ОД за счёт использования параметра $\varphi_{oz} / \varphi_{вып} > 1$. Снижение усилий в клетке 5 объясняется тем, что после прокатки в 4 клетки СК NRD параметр $S_{\%}$ в 2,2 раза меньше, чем при прокатке в СК SMS.

Таблица 25 – Геометрические параметры раската в поперечном сечении очагов деформации по клетям стана PQF при прокатке в СК SMS и NRD по данным результатов моделирования в среде QForm

№ клет и	толщина стенки в выпуске, мм	толщина стенки в вершине, мм	абсолютная разнотолщинность, мм	$\Delta S/S$, %	$S_{\%}$, %	изменение толщины стенки в выпуске, % (знак "+" - утонение)	отношение диаметра раската на входе в i-ую клеть по вершине калибра к диаметру раската по высоте калибра в i-ой клет	отношение диаметра раската по выпуску калибра к диаметру раската по вершине i-ой клетки	отношение диаметра раската по выпуску калибра к диаметру калибра по его ширине (по построению)	Среднее квадратичное отклонение	угол охвата оправки в очаге деформации, град
SMS Meer											
1	19,45	13,36	6,33	32,59	41,50	1,87	1,115	1,091	0,984	2,37	271,30
2	13,16	11,02	2,27	43,34	19,10	1,50	1,117	1,056	0,961	0,93	235,38
3	10,29	9,46	1,21	28,11	12,23	6,62	1,073	1,037	0,946	0,51	220,86
4	8,72	8,61	0,43	16,33	4,93	7,82	1,046	1,017	0,933	0,13	194,64
5	8,41	8,86	0,46	0,00	5,24	2,32	1,014	1,006	0,925	0,16	194,96
NRD											
1	18,86	15,41	6,18	22,25	39,88	4,84	1,093	1,066	0,946	2,28	262,62
2	13,69	13,56	2,37	28,10	19,12	11,16	1,086	1,033	0,950	0,94	222,69
3	11,80	9,19	2,64	32,87	26,63	12,98	1,081	1,052	0,950	0,96	249,25
4	8,78	8,74	0,20	25,93	2,24	4,46	1,057	1,016	0,934	0,06	237,02
5	8,54	8,28	0,27	5,69	3,16	2,29	1,021	1,006	0,920	0,09	244,27
* - длина контакта галтели валка с раскатом (переполнение) при прокатке в системе калибров SMS Meer в первой клет составляла 9,65 мм. В остальных случаях контакт раската с галтелью отсутствовал (по данным QForm).											

Таблица 26 – Характер распределения толщины стенки в ОД по клетям стана PQF

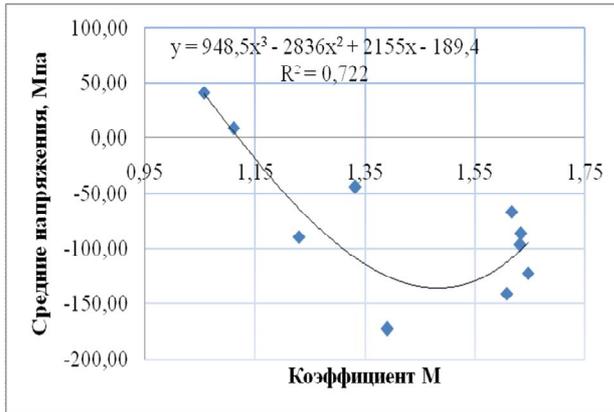
Номер клетки	СК SMS	СК NRD
1		
2		
3		
4		
5		

3.3.3 Методика расчёта показателей напряжённого состояния раската при прокатке на непрерывном раскатном стане с использованием различных систем калибров

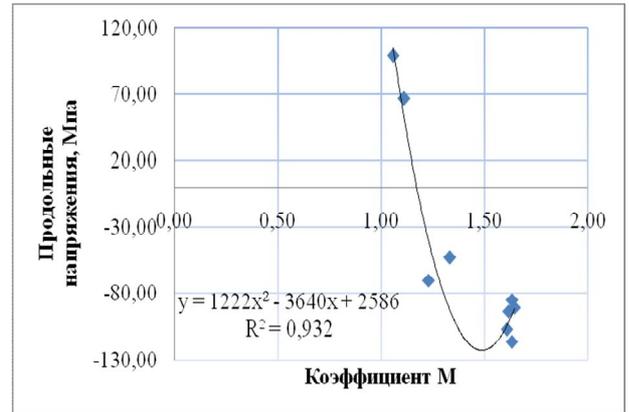
С использованием расчётных значений коэффициента неравномерности деформаций M и результатов моделирования в среде QForm возможно получение уравнений, описывающих взаимосвязь между показателями напряжённого состояния раската и неравномерностью деформаций, которые позволяют оперативно производить расчёт параметров процесса прокатки и осуществлять корректировку межвалкового зазора для различных систем калибров трёхвалковых НРС (таблица 28). На рисунках 52, 53 приведены графики зависимости показателей напряжённо-деформированного состояния раската от коэффициента M для СК SMS и NRD в соответствии с таблицей 28. При построении аналогичных графиков для СК SMS или NRD в отдельности коэффициент корреляции принимает значения более 0,9.

Таблица 28 – Расчётное значение коэффициента M и показателей напряжённо-деформированного состояния раската при прокатке труб $\varnothing 168,3 \times 8,9$ мм с использованием СК SMS и СК NRD стана PQF 190 мм (марка стали: 32Г2А)

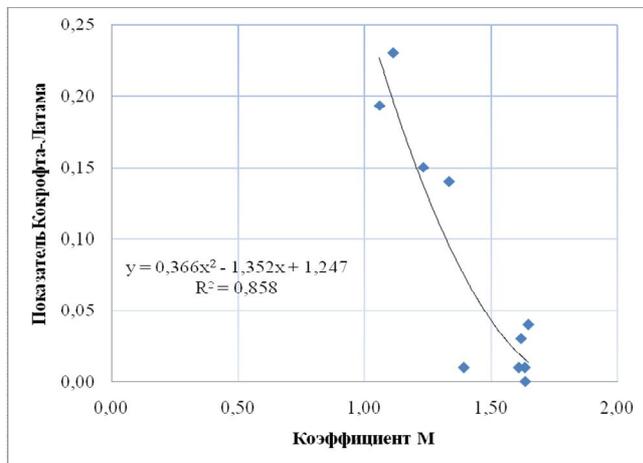
Обозначение зон ОД	Расчётные данные		Результаты моделирования в среде QForm				
	Сектор ОД для расчёта $M, ^\circ$	M	№ трассирующей точки	Показатели напряжённо-деформированного состояния раската			
				$\sigma, \text{МПа}$	$\sigma_{zz}, \text{МПа}$	C_{K-1}	σ/T
Клеть 1, СК SMS							
вершина	60-55	1,63	1	-96,35	-116,13	0,01	-0,92
	45-40	1,63	2	-86,28	-85,04	0,00	-0,83
	30-25	1,62	3	-66,51	-93,57	0,03	-0,65
	15-10	1,33	4	-43,79	-53,34	0,14	-0,45
выпуск	5-0	1,11	5	8,80	66,64	0,23	0,09
Клеть 1, СК NRD							
вершина	60-55	1,39	1	-172,77	-132,35	0,01	-1,58
	45-40	1,61	2	-140,98	-106,92	0,01	-1,30
	30-25	1,65	3	-122,36	-90,89	0,04	-1,13
	15-10	1,23	4	-89,39	-70,38	0,15	-0,84
выпуск	5-0	1,06	5	41,16	99,08	0,19	0,39
Клеть 2, СК SMS							
вершина	60-55	2,14	1	-142,31	-106,10	0,24	-1,22
	45-40	1,54	2	-118,67	-70,20	0,20	-0,98
	30-25	1,31	3	-77,89	35,05	0,12	-0,61
	15-10	1,03	4	19,04	96,00	0,22	0,15
выпуск	5-0	0,99	5	32,54	115,30	0,27	0,25
Клеть 2, СК NRD							
вершина	60-55	1,81	1	-125,13	-95,51	0,23	-1,17
	45-40	1,56	2	-99,30	-67,29	0,18	-0,92
	30-25	1,31	3	-54,62	38,06	0,10	-0,50
	15-10	1,05	4	25,37	85,84	0,22	0,23
выпуск	5-0	1,12	5	28,37	91,35	0,23	0,27



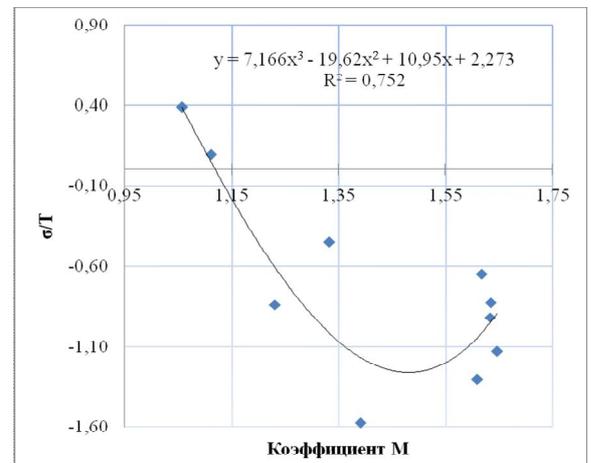
а



б

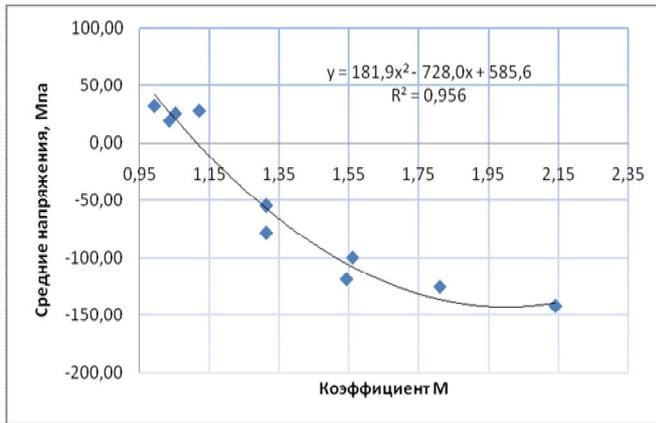


в

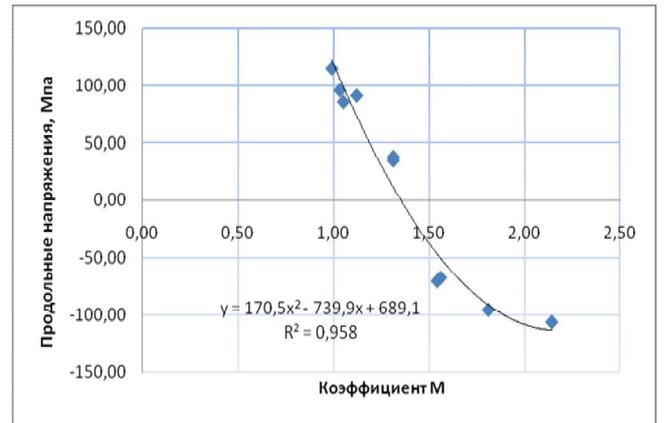


г

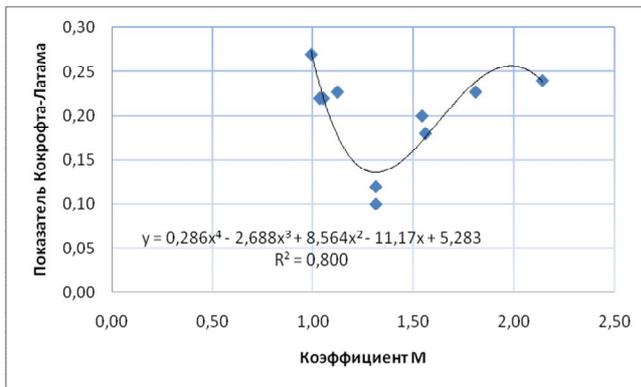
Рисунок 52 - Графики зависимости средних (а), продольных (б) напряжений, показателя Кокрофта-Латама (в), показателя σ/τ (г) от коэффициента М для клетки 1 (в соответствии с таблицей 28)



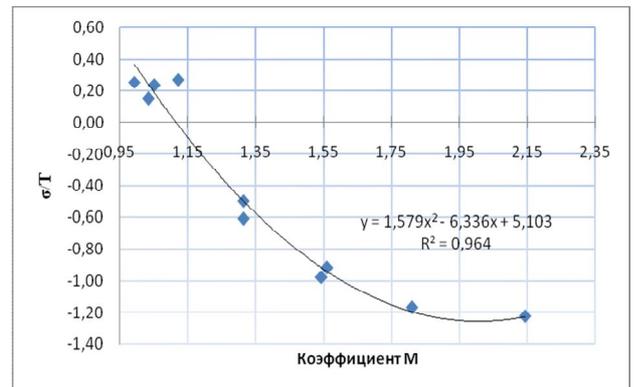
а



б



в



г

Рисунок 53 - Графики зависимости средних (а), продольных (б) напряжений, показателя Кокрофта-Латама (в), показателя σ/τ (г) от коэффициента М для клетки 2 (в соответствии с таблицей 28)

На рисунке 54 приведен алгоритм к расчёту калибровки валков стана PQF, учитывающий показатели напряжённого состояния раската и неравномерность деформации в калибрах.

На рисунке 54 символами обозначено:

$M_{SMS1}, M_{SMS2}, M_{NRD1}, M_{NRD2}$ - расчётный коэффициент неравномерности деформаций по вершине калибра при прокатке с использованием существующей и новой калибровки валков в первой и второй клетях стана PQF;

$\sigma_{SMS2}, \sigma_{NRD2}$ - условное обозначение показателей напряжённого состояния раската в ОД по выпуску калибра во второй клетки стана PQF при прокатке с

использованием существующей и новой калибровки валков во второй клетки, МПа;

$f(M) = \sigma$ - условное обозначение взаимосвязи показателей напряжённого состояния раската по периметру ОД в клетях стана PQF;

e_{new1}, e_{new2} - новая величина сведения или разведения валков, мм;

НКВ (NRD) – условное обозначение геометрических параметров новой калибровки валков для черновых клетей стана PQF.

Расчёт показателей напряжённого состояния раската в процессе прокатки для различного сортаментного ряда труб по данной методике расчёта, а также при освоении новых видов продукции, является перспективным направлением совершенствования технологии прокатки труб на НРС, так как такая методика расчёта учитывает множество факторов и в дальнейшем позволит производить расчёт:

- оптимальных режимов обжатий толщины стенки раската по клетям НРС;
- оптимальных геометрических параметров гильз и диаметров оправок НРС;
- оптимальной скорости удержания оправок НРС;
- оптимальных геометрических параметров калибровки валков НРС.

В таблице 29 и на рисунке 55 сведены расчётные значения коэффициента M и показателей напряжённого состояния раската при прокатке труб $\text{Ø}168,3 \times 8,9$ мм с использованием СК SMS и СК NRD стана PQF 190 мм для клетей 1, 2. При расчёте коэффициента M не учтена величина утонения толщины стенки по выпуску калибра.

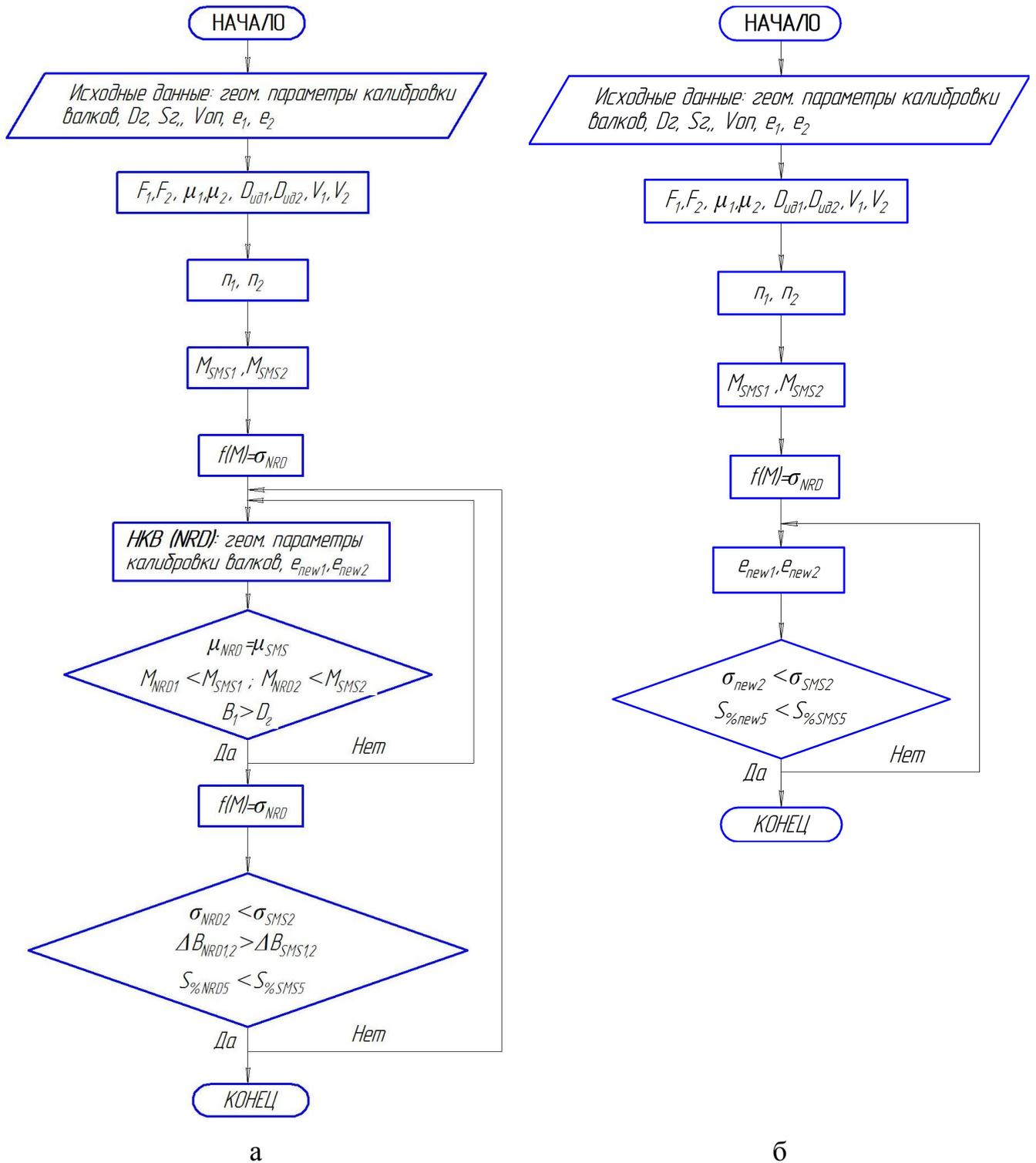


Рисунок 54 – Алгоритм к расчёту:

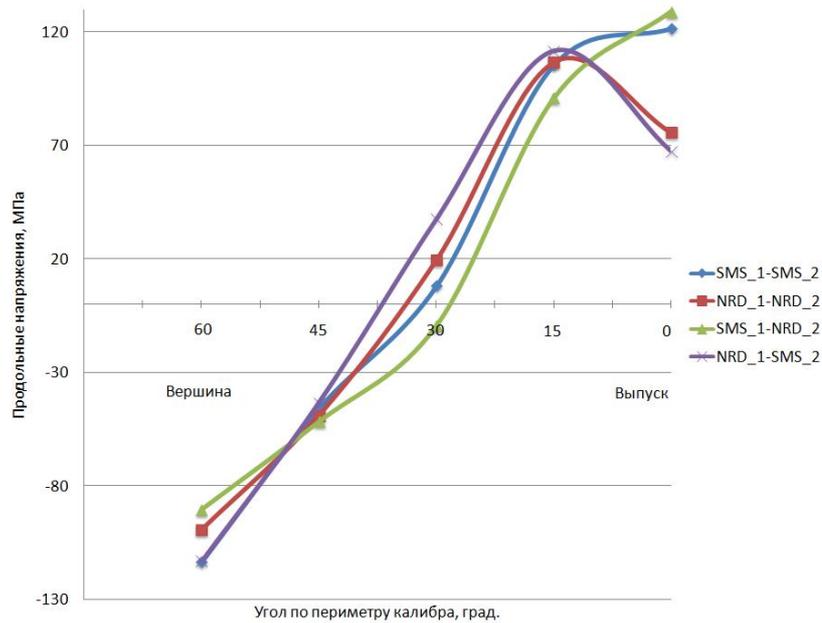
а – геометрических параметров новой калибровки валков в первой и второй клетях стана PQF; б – рациональных режимов обжаты по клетям стана PQF

Таблица 29 – Расчётные значения коэффициента М и показателей напряжённого состояния раската при прокатке труб Ø168,3x8,9 мм с использованием СК SMS и СК NRD стана PQF 190 мм для клетей 1, 2

СК	№ клетки	μ	H_i (H_{NRD}), мм	D_i , мм	n, об/мин	Сектор ОД для расчёта коэф. М, °	Коэф. М	Показатели напряжённого состояния раската		
								σ , МПа	σ_{zz} , МПа	σ/τ
СК SMS-SMS										
SMS-SMS	1 SMS	1,41	198,89	805,79	69,6	60-55	1,63	-105,691	-101,703	-0,987
						45-40	1,63	-104,857	-101,092	-0,980
						30-25	1,63	-103,982	-100,451	-0,973
						15-10	1,33	-107,965	-93,156	-1,007
						5-0	1,11	5,211	50,640	0,050
	2 SMS	1,32	193,17	844,97	93,3	60-55	2,13	-139,644	-113,383	-1,228
						45-40	1,54	-104,157	-46,028	-0,910
						30-25	1,32	-59,544	8,193	-0,519
						15-10	1,04	26,427	105,343	0,232
						5-0	1,00	41,061	121,410	0,360
СК NRD-NRD										
NRD-NRD	1 NRD	1,41	197,55	805,79	69,99	60-55	1,49	-137,108	-124,634	-1,266
						45-40	1,75	-21,703	-42,754	-0,260
						30-25	1,76	-13,177	-37,007	-0,186
						15-10	1,29	-93,534	-77,018	-0,876
						5-0	1,07	34,736	95,396	0,337
	2 NRD	1,32	193,15	844,97	91,01	60-55	1,88	-140,126	-99,282	-1,228
						45-40	1,55	-106,413	-48,929	-0,930
						30-25	1,29	-49,710	19,645	-0,433
						15-10	1,03	27,672	106,714	0,243
						5-0	1,12	-0,308	75,712	-0,001
СК SMS-NRD										
SMS-NRD	1 SMS	1,41	198,89	805,79	69,6	60-55	1,63	-105,691	-101,703	-0,987
						45-40	1,63	-104,857	-101,092	-0,980
						30-25	1,63	-103,982	-100,451	-0,973
						15-10	1,33	-107,965	-93,156	-1,007
						5-0	1,11	5,211	50,640	0,050
	2 NRD	1,32	193,15	844,97	91,01	60-55	1,80	-135,463	-90,333	-1,186
						45-40	1,57	-108,438	-51,553	-0,948
						30-25	1,39	-74,301	-9,257	-0,648
						15-10	1,07	13,369	90,920	0,118
						5-0	0,98	48,021	129,017	0,420
СК NRD-SMS										
NRD-SMS	1 NRD	1,41	197,55	805,79	69,99	60-55	1,49	-137,108	-124,634	-1,266
						45-40	1,75	-21,703	-42,754	-0,260
						30-25	1,76	-13,177	-37,007	-0,186
						15-10	1,29	-93,534	-77,018	-0,876
						5-0	1,07	34,736	95,396	0,337
	2 SMS	1,32	193,17	844,97	93,3	60-55	2,23	-133,508	-113,055	-1,176
						45-40	1,53	-102,048	-43,337	-0,891
						30-25	1,23	-33,927	37,791	-0,295
						15-10	1,02	32,079	111,559	0,281
						5-0	1,14	-7,735	67,406	-0,066

Анализ результатов, приведенных в таблице 29 и на рисунке 55, позволяет сделать вывод, что использование калибровки валков NRD в первой и второй клетях стана PQF является наиболее рациональным вариантом и позволяет снизить продольные напряжения по выпуску калибра во второй клетке на 37%

относительно варианта использования калибровки валков SMS в первой и второй клетях.



а



б

Рисунок 55 – Распределение продольных напряжений по периметру ОД во второй клетке при прокатке с использованием различных калибровок валков в первой и второй клетях стана PQF (а); общая схема методики расчета показателей напряжённого состояния раската в ОД при прокатке труб на стане PQF (б)

3.4 Выводы по главе

1. В результате анализа данных физического моделирования исследуемого процесса продольной прокатки труб установлено, что использование нового калибра NRD в первых двух проходах позволило снизить показатель переполнения калибров для второго прохода не менее чем в 20 раз, для третьего не менее чем в 2 раза. Характеристики точности раската $S\%$ и σ_S^2 после прокатки в калибрах СК NRD для всех проходов имели меньшие значения, чем при прокатке в калибрах СК ОВР. После четвёртого прохода в СК NRD $S\%$ и σ_S^2 имели меньшие значения в 1,55 и 2,5 раза соответственно, чем при прокатке в СК ОВР.

2. Сравнительный анализ показателей напряжённого состояния раската при прокатке с использованием существующей и новой системы калибров стана PQF в среде QForm позволил установить, что участки раската, располагающиеся по линии разъёма валков в очагах деформации 2-5 клеток наиболее подвержены разрушению металла в процессе прокатки. Определено, что при использовании СК NRD показатели напряжённого состояния раската в клетях 2-5 снижаются от 2,33% до 37,60%.

3. Разработана методика расчёта показателей напряжённого состояния раската, учитывающая полученные в работе научные результаты и позволяющая оперативно производить анализ калибровки валков, расчёт рациональных режимов обжатий по клетям стана PQF, а также разрабатывать новые виды калибров на основании расчётных данных. Показано, что использование предложенной методики расчёта показателей напряжённого состояния раската в процессе прокатки для различного сортаментного ряда труб, а также при освоении новых видов продукции, перспективно при совершенствовании технологии прокатки труб на НРС.

4. Установлено, что использование новой системы калибров NRD позволяет повысить точность раската за станом PQF в 1,66 раз и уменьшить переполнение калибров.

4 РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Результаты настоящего диссертационного исследования опробованы в условиях ТПА со станом PQF ПАО «ТАГМЕТ». Проведена серия опытно-промышленных прокаток с использованием новых систем калибров стана PQF 190 и 265 мм. При подготовке к опытно-промышленным прокаткам использовалась разработанная ММ для расчёта коэффициентов вытяжки и величины зазоров между валками по клетям стана PQF.

4.1 Испытания новой системы калибров стана PQF

4.1.1 Испытания системы калибров стана PQF 190 мм

В условиях ТПЦ ПАО «ТАГМЕТ» была проведена опытная прокатка труб наружным диаметром 168,3 мм, толщиной стенки 8,9 мм с использованием СК 190 мм стана PQF. Были прокатаны трубы марки стали 32Г2А, класса прочности К55 по стандарту API 5CT PSL1, R3.

Перед проведением опытной прокатки на калибровочном стенде осуществлялся контроль и измерение геометрических параметров валковых опор и кассет стана PQF калибра 190 мм, по результатам которого отклонений не зафиксировано.

Опытная прокатка проводилась с использованием (таблицы 30, 31):

- новой калибровки валков NRD в клетях № 1, 2 стана PQF, новой калибровки валков с параметром $\varphi_{оз} / \varphi_{вып} > 1$ в клетях № 3, 4 и существующей калибровки валков «SMS Meer» в пятой клетке с параметром $\varphi_{оз} / \varphi_{вып} = 1$. Прокатано 870 шт. труб;

- существующей калибровкой валков «SMS Meer» для клетей № 2-5 и новой калибровки валков NRD в клетке 1. Прокатано шт. 2648 труб.

Таблица 30 – Параметры калибровки валков стана PQF

Система калибров	№ клетки	Калибровка валков	Вид калибра	$\varphi_{оз} / \varphi_{вып}$	Овальность	Эксцентриситет, мм
СК NRD	1	Приложение Б	NRD	0,88	1,150	0,00
	2		NRD	1,14	1,118	0,00
	3	Приложение В	круг – радиусный выпуск	1,14	1,110	0,00
	4			1,31	1,090	0,00
	5	Приложение А		1,00	1,090	0,00
СК SMS	1	Приложение Б	NRD	0,88	1,150	0,00
	2	Приложение А	овал – радиусный выпуск	1,00	1,107	2,05
	3		круг – радиусный выпуск	0,88	1,119	0,00
	4			1,00	1,092	0,00
	5			1,00	1,092	0,00

Таблица 31 – Настраочные параметры стана PQF

Система калибров	№ клетки	Диаметр оправки, мм	Высота калибра, мм	Обороты валков, об/мин	Скорость удержания оправки, мм/сек	Идеальный диаметр валков, мм
СК NRD	1	172, 35	199,41	68,39	791,64	805
	2		194,25	90,58		845
	3		190,06	120,57		795
	4		189,13	154,22		720
	5		189,13	162,22		715
СК SMS	1		198,79	69,74		805
	2		193,07	98,46		810
	3		189,85	115,28		835
	4		189,13	163,59		690
	5		189,13	162,22		715

При анализе результатов опытной прокатки придерживались ранее разработанной и согласованной методики проведения исследования геометрических параметров раската по линии ТПА, подробно описанной в параграфе 2.5.1 настоящей работы.

Для прокатки использовались гильзы наружным диаметром 222,0 мм с толщиной стенки 19,82 мм. Доля эксцентриситетности по телу гильз достигала 0,76, однако этот фактор не оказал существенного влияния на качество готовых труб (рисунки 60, 61).

Геометрические параметры раската за ИКС и готовых труб, приведены в таблицах 32-35.

Характеристики точности раската и готовых труб приведены на рисунках 56-61.

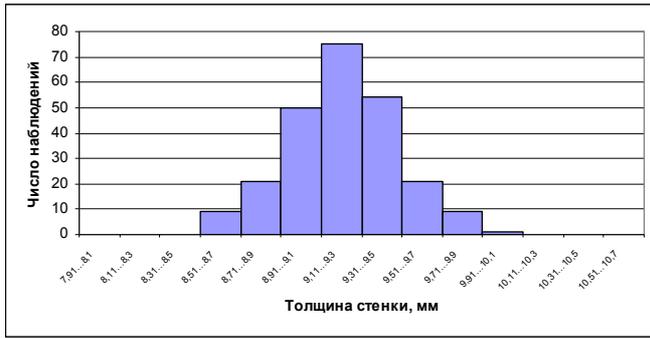
Таблица 32 – Результаты измерений толщины стенки раската за ИКС, изготовленного с использованием системы калибра NRD, плавка № 5131 2

Номер точки измерения толщины стенки в поперечном сечении раската за ИКС	Номер сечения по длине раската за ИКС																			
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX
1	9,15	8,88	8,86	8,99	8,97	8,99	8,82	8,91	9,18	8,67	9,10	9,17	9,43	8,92	9,50	9,15	9,04	9,10	9,19	9,03
2	9,48	9,19	9,30	9,38	9,19	9,44	9,50	9,51	9,48	9,10	9,66	9,62	9,29	9,13	9,24	9,12	9,28	9,22	9,11	9,69
3	9,77	9,11	9,26	9,28	9,33	9,20	9,26	9,36	9,12	8,95	9,43	9,53	9,17	9,20	9,53	9,37	9,24	9,17	9,17	9,66
4	9,64	9,32	9,24	8,97	9,25	9,02	9,19	9,10	8,83	8,93	9,42	9,00	8,73	8,78	8,94	8,62	8,57	8,70	8,54	8,98
5	9,38	9,04	9,23	9,28	8,97	8,78	9,11	8,93	8,88	8,88	9,40	9,06	9,18	9,17	9,24	9,13	9,21	9,11	9,22	9,46
6	9,88	9,65	9,87	9,73	9,81	9,42	9,50	9,42	9,03	9,25	9,69	9,21	9,36	9,45	9,35	9,09	9,13	8,91	9,02	9,17
7	9,61	9,38	9,65	9,42	9,28	9,39	9,28	8,97	9,41	9,30	9,33	9,30	9,57	9,21	9,31	9,00	9,31	9,28	9,38	
8	9,92	9,83	9,76	9,78	9,49	9,38	9,15	9,01	8,91	9,57	8,91	8,68	8,83	9,10	8,60	8,97	8,80	8,84	8,77	8,70
9	9,90	9,20	9,09	9,09	9,22	9,02	8,95	8,72	9,04	9,21	8,82	9,13	9,23	9,08	8,97	9,12	8,98	9,04	8,91	8,97
10	9,73	9,46	9,41	9,49	9,39	9,40	9,30	9,25	9,50	9,55	9,03	9,43	9,39	9,33	9,02	9,55	9,35	9,55	9,39	9,22
11	9,66	9,17	9,22	9,31	9,25	9,37	9,08	9,25	9,45	9,35	8,86	9,41	9,44	9,39	9,20	9,39	9,34	9,50	9,30	9,25
12	9,56	8,65	9,17	8,75	9,10	9,35	9,30	9,23	9,05	8,83	9,05	9,18	9,14	8,78	9,14	8,97	8,85	9,19	9,15	8,90
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по сечениям, мм																			
MIN	9,15	8,65	8,86	8,75	8,97	8,78	8,82	8,72	8,83	8,67	8,82	8,68	8,73	8,78	8,60	8,62	8,57	8,70	8,54	8,70
MAX	9,92	9,83	9,87	9,78	9,81	9,44	9,50	9,51	9,50	9,57	9,69	9,62	9,44	9,57	9,53	9,55	9,35	9,55	9,39	9,69
MAX-MIN	0,77	1,18	1,01	1,03	0,84	0,66	0,68	0,79	0,67	0,90	0,87	0,94	0,71	0,79	0,93	0,93	0,78	0,85	0,85	0,99
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу раската, мм																			
	1,38																			
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу раската без учёта сечений I и XX																			
Обрезь	1,33																		Обрезь	
	Разнотолщинность стенки раската по сечениям относительно номинальной толщины стенки готовых труб, %																			
MIN	2,81	-2,81	-0,45	-1,69	0,79	-1,35	-0,90	-2,02	-0,79	-2,58	-0,90	-2,47	-1,91	-1,35	-3,37	-3,15	-3,71	-2,25	-4,04	-2,25
MAX	11,46	10,45	10,90	9,89	10,22	6,07	6,74	6,85	6,74	7,53	8,88	8,09	6,07	7,53	7,08	7,30	5,06	7,30	5,51	8,88
Общее поле допуска,%	15,50																			
Общее поле допуска,%	Обрезь	14,94																		Обрезь
	Среднеквадратичное отклонение																			
σ_s , мм	0,218	0,307	0,278	0,292	0,219	0,212	0,192	0,224	0,226	0,282	0,289	0,246	0,215	0,240	0,246	0,231	0,230	0,239	0,233	0,292

Плеть за ИКС двукратная, поэтому в таблицах 32, 33 поперечные сечения I-X, XI-XX соответствуют двум готовым трубам.

Таблица 33 – Результаты измерений толщины стенки раската за ИКС, изготовленного с использованием системы калибра SMS, плавка № 8060 1

Номер точки измерения толщины стенки в поперечном сечении раската за ИКС	Номер сечения по длине раската за ИКС																				
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	
1	10,50	10,12	10,17	10,19	10,15	9,27	9,27	9,84	9,29	9,26	9,32	9,79	8,98	9,27	9,32	9,28	9,23	9,33	9,29	9,36	
2	10,07	9,87	9,78	9,66	9,60	8,65	8,89	9,35	8,78	8,80	8,90	9,16	8,46	9,00	9,05	9,35	9,10	9,08	9,13	9,15	
3	10,15	9,72	9,75	9,62	9,40	8,76	9,20	9,29	8,90	9,03	8,92	9,17	8,57	9,48	9,15	9,29	9,36	9,41	9,31	9,43	
4	9,47	9,02	9,04	8,95	9,00	8,57	9,05	9,03	8,62	8,82	8,96	8,76	8,77	9,33	8,92	9,38	9,46	9,59	9,40	9,42	
5	9,66	9,31	9,31	9,33	9,25	9,32	9,88	9,55	9,32	9,59	9,57	9,27	9,52	9,88	9,43	9,73	9,70	9,63	9,48	9,41	
6	9,14	8,54	8,76	8,74	8,76	9,74	9,80	9,40	9,51	9,53	9,74	8,85	9,33	9,38	9,05	9,10	9,15	9,09	9,12	9,05	
7	9,09	8,43	8,50	8,50	8,64	9,51	9,36	9,14	9,38	9,30	9,20	8,78	9,42	9,25	9,11	8,96	8,47	9,00	8,77	8,89	
8	8,51	8,00	8,40	8,11	8,47	9,03	8,51	8,29	8,87	8,70	8,80	8,50	9,40	8,95	9,18	8,69	8,78	8,87	9,06	8,83	
9	9,55	9,20	9,18	9,40	9,36	9,79	9,21	9,19	9,55	9,29	9,26	9,21	9,76	9,23	9,25	8,92	8,99	8,94	9,02	9,19	
10	9,40	9,03	9,02	9,02	9,05	9,24	8,79	8,91	9,38	9,06	8,87	9,17	9,24	8,77	9,26	8,68	8,80	8,86	8,75	9,02	
11	10,25	9,45	9,38	9,38	9,38	9,21	8,81	9,33	9,22	9,13	9,04	9,55	9,09	8,92	8,99	8,65	8,69	8,65	8,74	8,92	
12	10,06	9,58	9,51	9,62	9,31	8,80	8,66	9,12	9,33	8,75	8,92	9,36	8,71	8,79	9,22	9,03	9,03	9,01	9,09	9,30	
	Абсолютная поперечная разностенность по сечениям																				
MIN	8,51	8,00	8,40	8,11	8,47	8,57	8,51	8,29	8,62	8,70	8,80	8,50	8,46	8,77	8,92	8,65	8,47	8,65	8,74	8,83	
MAX	10,50	10,12	10,17	10,19	10,15	9,79	9,88	9,84	9,55	9,59	9,74	9,79	9,76	9,88	9,43	9,73	9,70	9,63	9,48	9,43	
MAX-MIN	1,99	2,12	1,77	2,08	1,68	1,22	1,37	1,55	0,93	0,89	0,94	1,29	1,30	1,11	0,51	1,08	1,23	0,98	0,74	0,60	
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу раската, мм (%)																				
	2,50																				
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу раската без учёта сечений I и XX																				
Обрезь	2,19																			Обрезь	
	Разнотолщинность стенки раската по сечениям относительно номинальной толщины стенки готовых труб, %																				
MIN	-4,38	-10,11	-5,62	-8,88	-4,83	-3,71	-4,38	-6,85	-3,15	-2,25	-1,12	-4,49	-4,94	-1,46	0,22	-2,81	-4,83	-2,81	-1,80	-0,79	
MAX	17,98	13,71	14,27	14,49	14,04	10,00	11,01	10,56	7,30	7,75	9,44	10,00	9,66	11,01	5,96	9,33	8,99	8,20	6,52	5,96	
Общее поле допуска,%	28,09																				
Общее поле допуска,%	Обрезь	24,61																			Обрезь
	Среднеквадратичное отклонение																				
σ_s , мм	0,552	0,600	0,507	0,549	0,436	0,389	0,406	0,362	0,293	0,286	0,285	0,345	0,392	0,307	0,140	0,317	0,334	0,292	0,239	0,211	



а



б

Рисунок 56 - Частотное распределение толщины стенки на раскате за ИКС, полученного с использованием: а – СК NRD, б – СК SMS

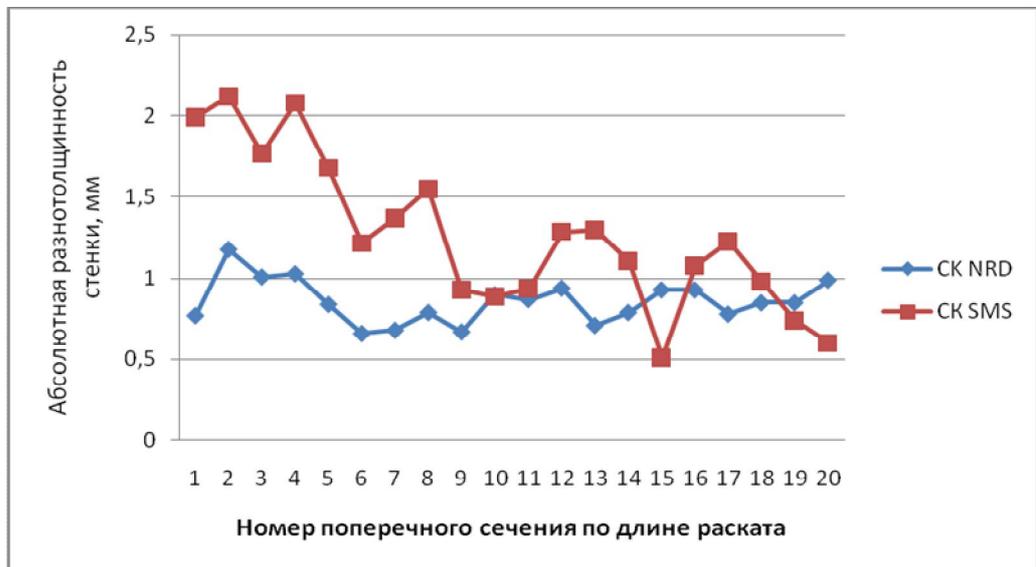


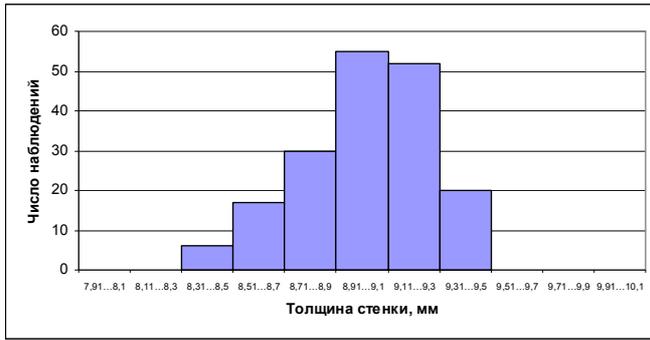
Рисунок 57 - Абсолютная разнотолщинность стенки на раскате за ИКС

Таблица 34 – Результаты измерений толщины стенки готовых труб, изготовленных с использованием системы калибра NRD, плавка № 5131 2

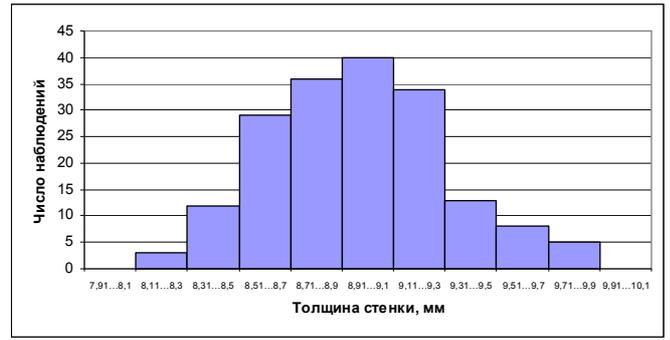
Номер точки измерения толщины стенки в поперечном сечении трубы	Номер сечения по длине трубы														
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
1	9,13	9,20	9,28	9,20	9,40	9,24	9,09	8,96	9,22	9,01	8,96	8,96	9,00	9,07	9,11
2	9,21	8,96	8,69	8,93	8,94	8,80	9,25	9,05	9,43	9,27	9,06	9,33	9,35	9,28	9,24
3	9,34	9,10	9,12	9,01	9,12	8,68	8,61	8,63	8,57	8,41	8,61	8,51	8,49	8,58	8,49
4	9,15	9,04	9,06	9,04	9,11	9,25	9,32	9,38	9,33	9,18	9,25	9,33	9,22	9,28	9,41
5	9,24	9,06	9,26	9,17	9,07	9,01	8,92	8,88	9,29	9,12	9,10	9,10	9,11	9,05	9,05
6	8,50	8,85	9,01	8,85	8,75	9,00	9,20	9,33	9,20	9,20	9,34	9,32	9,28	9,32	9,43
7	8,95	9,04	8,95	9,06	8,92	8,94	8,58	8,92	8,87	8,96	8,83	8,90	8,91	8,77	8,85
8	8,78	9,03	8,62	8,75	8,62	9,29	9,30	9,50	9,01	9,21	9,15	9,11	9,03	9,06	9,15
9	8,98	9,02	9,04	9,18	9,15	9,15	8,97	9,21	8,89	8,96	8,88	8,85	8,68	8,80	8,85
10	8,70	8,73	8,67	8,79	8,72	8,96	9,25	9,48	9,23	9,31	9,21	9,16	9,14	9,06	9,06
11	8,79	8,87	8,87	8,78	8,99	8,80	8,73	8,90	8,80	8,65	8,55	8,65	8,50	8,40	8,42
12	9,12	9,03	9,12	9,15	9,23	9,06	9,21	9,30	9,35	9,05	8,99	8,90	8,95	9,00	8,87
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по сечениям готовой трубы, мм														
MIN	8,50	8,73	8,62	8,75	8,62	8,68	8,58	8,63	8,57	8,41	8,55	8,51	8,49	8,40	8,42
MAX	9,34	9,20	9,28	9,20	9,40	9,29	9,32	9,50	9,43	9,31	9,34	9,33	9,35	9,32	9,43
MAX-MIN	0,84	0,47	0,66	0,45	0,78	0,61	0,74	0,87	0,86	0,90	0,79	0,82	0,86	0,92	1,01
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу готовой трубы, мм														
	1,10														
	Относительная разнотолщинность стенки готовой трубы, %														
MIN	-4,49	-1,91	-3,15	-1,69	-3,15	-2,47	-3,60	-3,03	-3,71	-5,51	-3,93	-4,38	-4,61	-5,62	-5,39
MAX	4,94	3,37	4,27	3,37	5,62	4,38	4,72	6,74	5,96	4,61	4,94	4,83	5,06	4,72	5,96
Общее поле допуска,%	12,36														
	Среднеквадратичное отклонение														
σ_s , мм	0,242	0,120	0,212	0,161	0,216	0,186	0,259	0,265	0,255	0,253	0,234	0,254	0,273	0,273	0,304

Таблица 35 – Результаты измерений толщины стенки готовых труб, изготовленных с использованием системы калибра SMS, плавка № 8060 2

Номер точки измерения толщины стенки в поперечном сечении трубы	Номер сечения по длине трубы														
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
1	9,36	9,20	8,92	9,12	8,90	8,83	9,18	9,01	9,06	8,85	9,05	9,06	9,36	9,06	9,03
2	9,23	8,90	8,83	8,69	8,71	8,73	8,78	8,96	8,85	8,55	8,99	9,03	9,15	8,99	8,99
3	9,71	9,36	9,16	9,13	9,30	9,69	9,40	9,23	9,77	9,15	9,84	9,69	9,66	9,62	9,56
4	9,01	8,79	8,79	8,83	8,87	9,40	9,01	9,06	9,47	8,79	9,53	9,78	9,81	9,49	9,10
5	8,56	8,48	8,69	8,70	8,83	9,12	8,78	8,83	9,30	8,67	9,18	8,96	8,73	9,01	8,70
6	8,19	8,19	8,41	8,52	8,41	8,83	8,46	8,65	9,00	8,46	8,55	8,66	8,52	8,54	8,40
7	8,85	9,03	9,34	9,37	9,15	9,61	9,23	9,20	9,52	9,39	9,01	9,12	9,01	8,83	8,99
8	8,26	8,69	8,73	8,84	8,77	8,75	9,10	9,01	8,90	9,23	8,56	8,67	8,61	8,56	8,54
9	8,40	8,91	8,90	9,01	9,01	8,75	9,14	9,17	8,94	9,35	8,46	8,57	8,58	8,54	8,56
10	8,41	8,76	8,64	8,85	8,75	8,42	8,84	9,02	8,50	9,20	8,42	8,67	8,70	8,56	8,57
11	9,10	9,10	9,01	9,14	9,18	8,90	9,14	9,28	8,80	9,49	9,00	9,00	9,13	9,00	9,22
12	9,20	8,94	8,73	8,96	9,10	8,68	9,21	9,39	8,85	9,00	9,23	9,24	9,22	9,20	9,27
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по сечениям готовой трубы, мм														
MIN	8,19	8,19	8,41	8,52	8,41	8,42	8,46	8,65	8,50	8,46	8,42	8,57	8,52	8,54	8,40
MAX	9,71	9,36	9,34	9,37	9,30	9,69	9,40	9,39	9,77	9,49	9,84	9,78	9,81	9,62	9,56
MAX-MIN	1,52	1,17	0,93	0,85	0,89	1,27	0,94	0,74	1,27	1,03	1,42	1,21	1,29	1,08	1,16
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу готовой трубы, мм														
	1,65														
	Относительная разнотолщинность стенки готовой трубы, %														
MIN	-7,98	-7,98	-5,51	-4,27	-5,51	-5,39	-4,94	-2,81	-4,49	-4,94	-5,39	-3,71	-4,27	-4,04	-5,62
MAX	9,10	5,17	4,94	5,28	4,49	8,88	5,62	5,51	9,78	6,63	10,56	9,89	10,22	8,09	7,42
Общее поле допуска,%	18,54														
	Среднеквадратичное отклонение														
σ_s , мм	0,467	0,303	0,235	0,228	0,237	0,379	0,249	0,195	0,348	0,329	0,418	0,372	0,409	0,351	0,340



а



б

Рисунок 58 - Частотное распределение толщины стенки на готовых трубах, полученных с использованием:

а – СК NRD (отклонения толщины стенки: -5,62% / +6,74%);

б – СК SMS (отклонения толщины стенки: -7,98% / +10,56%)

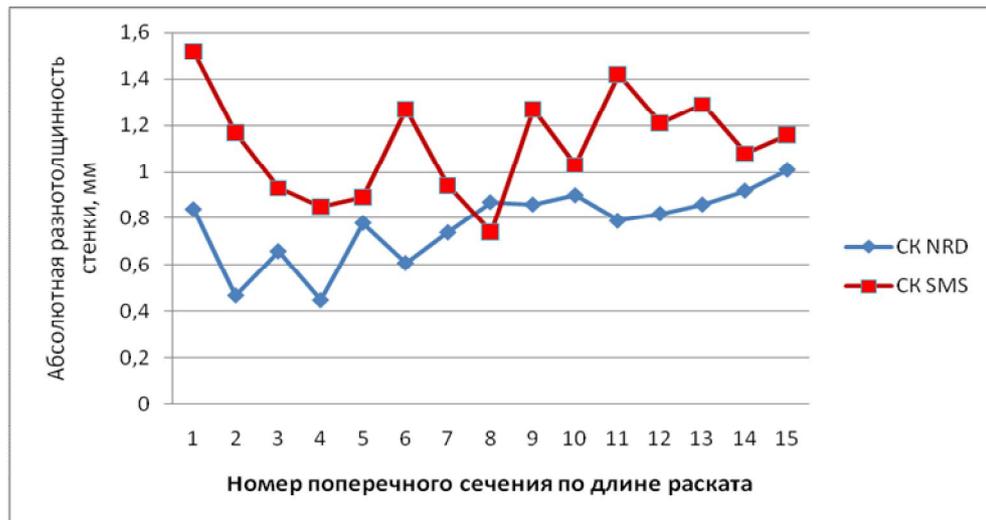


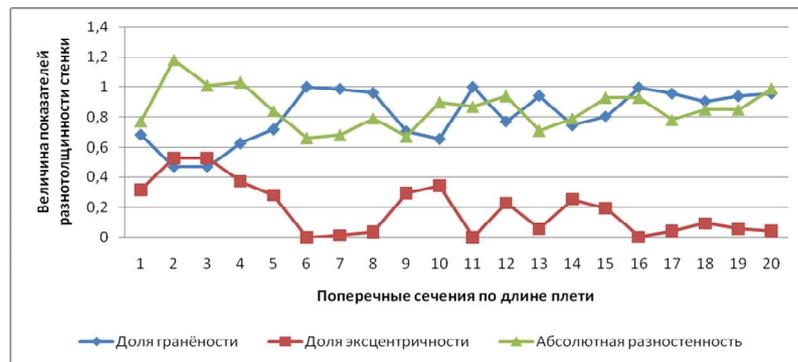
Рисунок 59 - Абсолютная разнотолщинность стенки на готовых трубах

Анализ частотного распределения, измеренных толщин стенок раската за ИКС показал, что максимальное количество наблюдений толщин стенки, соответствующих номинальному значению по таблице прокатки, получено при использовании СК NRD, а поле отклонений толщины стенки меньше в 1,65 раз в сравнении с СК SMS (таблицы 32, 33).

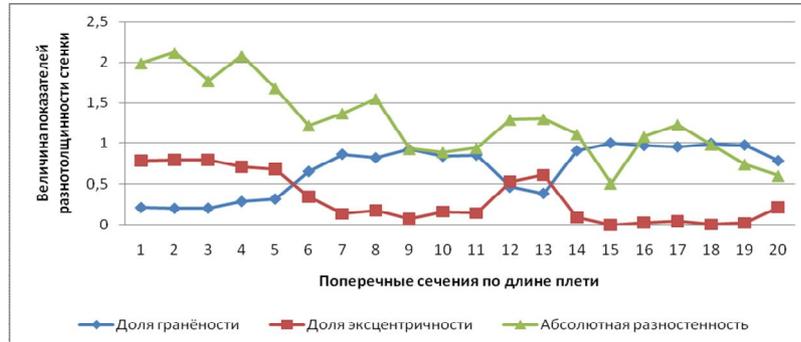
Анализ частотного распределения, измеренных толщин стенок на готовых трубах показал, что максимальное количество наблюдений толщин стенки, соответствующих номинальному значению по таблице прокатки, получено при

использовании СК NRD, а поле отклонений толщины стенки меньше в 1,50 раз в сравнении с СК SMS (таблицы 34, 35).

Распределение показателей разнотолщинности стенки на раскате за ИКС и на готовых трубах (рисунки 60, 61) показали, что параметр $S_{\%, \text{осьТПА}}$ находился в диапазоне 0,67-8,76%, соответственно поперечная разнотолщинность стенки на готовых трубах в большей степени обусловлена неравномерностью деформации по клетям стана PQF.

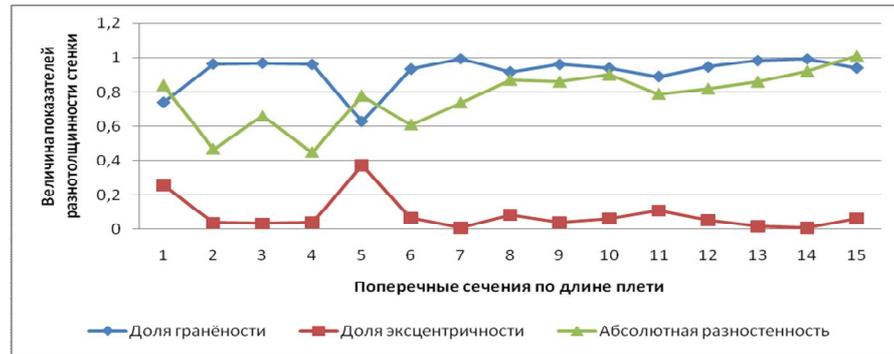


а

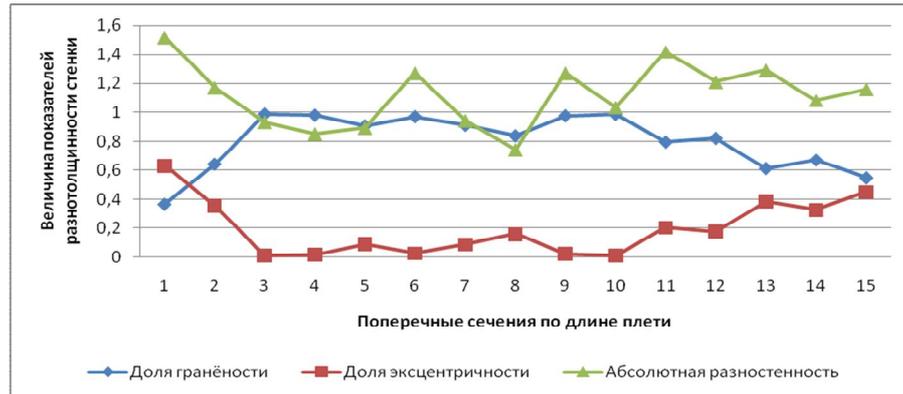


б

Рисунок 60 – Характеристики точности раската за станом ИКС при прокатке с использованием: а - СК NRD; б - СК SMS



а



б

Рисунок 61 – Характеристики точности готовых труб при прокатке с использованием: а - СК NRD; б - СК SMS

Во время опытной прокатки с использованием СК NRD и СК SMS 190 мм сквозных отверстий на раскате по горячему переделу и на готовых трубах не обнаружено.

Брак по разнотолщинности стенки на готовых трубах, прокатанных с использованием, СК SMS 190 мм составил 0,64%, с использованием СК NRD 190 мм – 0,0%.

При использовании СК NRD зафиксировано снижение брака по дефектам внутренней поверхности с первого предъявления в 1,83 раза, окончательный брак снизился в 1,36 раз.

В таблице 36 приведены усилия на валки стана PQF при установившемся процессе в соответствии с результатами опытной прокатки и прокатки аналогичного сортамента с использованием СК SMS от 17.02.2014 г. При

использовании калибровки валков NRD в клети 1 зафиксировано снижение усилия на валки стана PQF не менее чем на 2,0% в первой клети и на 7,31 % во второй клети. Увеличение усилий в клети 4 обусловлено использованием калибровки валков с параметром $\varphi_{оз} / \varphi_{вып} > 1$, соответственно толщина стенки раската по периметру калибра подвергалась большим обжатиям, что также положительно повлияло на точность труб.

Таблица 36 - Усилия на валки стана PQF

№ клети	Усилие на валок, кН		
	СК NRD от 28.02.2013 г.	СК SMS* от 01.03.2013 г.	СК SMS** от 17.02.2013 г.
1	1681,04	1653,12	1717,04
2	1992,80	2162,24	2150,05
3	1591,88	1562,16	1608,40
4	1028,53	836,13	866,19
5	274,94	351,34	396,82
*- настроечные параметры в соответствии с таблицей 31.			
**- настроечные параметры в соответствии с таблицей 21.			

В системе калибров NRD величина износа валков в клети 4 превосходит величину износа валков СК SMS (таблица 37), а в клети 1 величина износа меньше, что обусловлено величинами обжатия толщины стенки по вершине калибров. Следует отметить, что, с точки зрения точности труб, определяющей является величина износа валков по дну калибра в пятой клети, это обусловлено характером распределения толщины стенки раската в поперечном сечении ОД за пятой клетью стана PQF (параграфы: 2.6, 3.3).

Таблица 37 - Средняя величина износа валков по клетям стана PQF

№ клетки	Производитель	Период работы СК		Прокатано с использованием СК, тонн		Средний износ по вершине калибра на 1000 тн., мм	
		SMS	NRD	SMS	NRD	SMS	NRD
1	ПАО «Днепропетровский завод прокатных валков»	11.02 - 14.02.2013	28.02-04.03.2013	4445	5844	0,63	0,53
2		11.02 - 14.02.2013	28.02-01.03.2013	4445	1527	0,19	0,17
3		11.02 - 14.02.2013	28.02-01.03.2013	4445	1527	0,24	0,27
4		11.02 - 14.02.2013	28.02-01.03.2013	4445	1527	0,11	0,27
5		11.02 - 14.02.2013	28.02-01.03.2013	4445	1022	0,06	0,08

4.1.2 Испытания системы калибров стана PQF 265 мм

В условиях ТПЦ ПАО «ТАГМЕТ» была проведена опытная прокатка труб наружным диаметром 219,0 мм, с толщиной стенки 6,0 мм из марки стали 20 по ГОСТ 8731-74 с использованием различных СК стана PQF 265 мм (таблицы 38, 39):

- с новой калибровки валков NRD в клетях № 1, 2 стана PQF и новой калибровки валков с параметром $\varphi_{оз} / \varphi_{вып} > 1$ в клетях № 3, 4, 5. Прокатано 542 шт. труб;

- с существующей калибровкой валков «SMS Meer» для клетей № 1-5 (СК SMS, Приложение А). Прокатано 1290 штук труб.

Таблица 38 – Параметры калибровки валков стана PQF

Система калибров	№ клетки	Калибровка валков	Вид калибра	$\varphi_{оз} / \varphi_{вып}$	Овальность	Эксцентриситет, мм
СК NRD	1	Приложение Б	NRD	0,88	1,150	0,00
	2		NRD	1,14	1,114	0,00
	3	Приложение В	круг – радиусный выпуск	1,14	1,110	0,00
	4	Приложение В (калибровка для клетки 4)		1,31	1,088	0,00
	5			1,31	1,088	0,00
СК SMS	1	Приложение А	овал – радиусный выпуск	1,07	1,123	9,70
	2			1,14	1,076	4,05
	3		круг – радиусный выпуск	0,88	1,065	0,00
	4			1,00	1,046	0,00
	5			1,00	1,046	0,00

Таблица 39 – Настроечные параметры стана PQF

Система калибров	№ клетки	Диаметр оправки, мм	Высота калибра, мм	Обороты валков, об/мин	Скорость удержания оправки, мм/сек	Идеальный диаметр валков, мм
СК NRD	1	253,15	273,31	52,04	864	845
	2		268,84	76,74		900
	3		265,30	94,10		890
	4		264,42	159,03		705
	5		264,42	178,11		695
СК SMS	1	250,00	270,29	48,25		865
	2		265,47	74,64		900
	3		261,56	108,46		850
	4		261,18	164,41		695
	5		261,18	164,83		730

Геометрические параметры раската за ИКС и готовых труб, приведены в таблицах 40-42.

Характеристики точности раската и готовых труб приведены на рисунках 62-64. Параметр $S_{\%2,осьПИА}$ превышал 10,0%, соответственно в период проведения опытно-промышленной прокатки поперечная разнотолщинность стенки на готовых трубах была обусловлена неравномерностью деформации по клетям стана PQF, разнотолщинностью стенки гильз, качеством осевой настройки оборудования.

Таблица 40 – Результаты измерений толщины стенки раската за ИКС, изготовленного с использованием системы калибра NRD, плавка № 40071

Номер точки измерения толщины стенки в поперечном сечении раската за ИКС	Номер сечения по длине раската за ИКС																			
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX
1	7,17	6,53	6,61	6,53	6,44	6,46	6,47	6,43	6,36	6,37	6,34	6,30	6,33	6,35	6,24	6,51	6,51	6,52	6,44	6,24
2	6,28	6,12	6,07	6,04	6,04	6,04	6,00	5,93	5,91	5,95	5,86	5,92	5,94	5,93	5,82	6,09	6,03	6,01	6,16	6,03
3	6,78	6,33	6,28	6,39	6,24	6,23	6,09	6,05	6,00	6,04	5,95	5,96	5,97	5,91	5,81	6,00	5,92	5,86	5,95	6,11
4	6,31	5,87	6,09	5,93	5,84	5,86	5,88	5,77	5,90	5,77	5,82	6,04	6,10	5,70	5,89	6,02	5,91	5,81	5,79	5,61
5	7,27	6,27	6,52	6,43	6,31	6,20	6,29	6,26	6,26	6,28	6,15	6,27	6,38	6,16	6,20	5,95	5,92	6,13	6,07	6,10
6	6,66	5,93	5,87	5,98	5,94	5,78	5,93	5,91	5,90	5,86	5,88	5,88	6,11	5,89	5,97	5,81	5,70	5,73	5,81	5,88
7	6,90	6,30	6,21	6,34	6,20	6,11	6,10	6,15	6,21	6,18	5,94	6,07	6,15	5,88	6,03	5,79	5,70	5,85	5,93	5,69
8	6,40	5,92	5,77	5,76	5,78	5,69	5,95	5,85	5,82	5,75	5,96	5,77	5,93	5,94	6,04	5,66	5,61	5,64	5,63	5,63
9	7,13	6,40	6,42	6,34	6,25	6,31	6,18	6,38	6,27	6,43	6,27	6,37	6,21	6,28	6,34	5,96	6,06	6,18	5,93	5,96
10	6,30	6,03	5,82	5,89	5,85	5,90	5,93	5,88	5,91	5,92	5,88	5,83	5,84	5,96	5,94	5,72	5,89	5,77	5,74	5,93
11	6,53	6,40	6,22	6,24	6,11	6,13	6,11	6,03	6,04	6,04	6,07	5,97	5,93	6,01	5,99	5,78	5,96	5,79	5,73	5,99
12	6,10	6,02	5,99	5,92	5,83	5,95	6,20	5,82	5,88	5,83	5,78	5,83	5,80	5,90	5,88	6,03	5,88	5,83	5,73	5,89
Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по сечениям, мм																				
MIN	6,10	5,87	5,77	5,76	5,78	5,69	5,88	5,77	5,82	5,75	5,78	5,77	5,80	5,70	5,81	5,66	5,61	5,64	5,63	5,61
MAX	7,27	6,53	6,61	6,53	6,44	6,46	6,47	6,43	6,36	6,43	6,34	6,37	6,38	6,35	6,34	6,51	6,51	6,52	6,44	6,24
MAX-MIN	1,17	0,66	0,84	0,77	0,66	0,77	0,59	0,66	0,54	0,68	0,56	0,60	0,58	0,65	0,53	0,85	0,90	0,88	0,81	0,63
Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу раската, мм																				
1,66																				
Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу раската без учёта сечений I и XX																				
Обрезь	1,00																			Обрезь
Разнотолщинность стенки раската по сечениям относительно номинальной толщины стенки готовых труб, %																				
MIN	1,67	-2,17	-3,83	-4,00	-3,67	-5,17	-2,00	-3,83	-3,00	-4,17	-3,67	-3,83	-3,33	-5,00	-3,17	-5,67	-6,50	-6,00	-6,17	-6,50
MAX	21,17	8,83	10,17	8,83	7,33	7,67	7,83	7,17	6,00	7,17	5,67	6,17	6,33	5,83	5,67	8,50	8,50	8,67	7,33	4,00
Общее поле допуска, %	27,67																			
Общее поле допуска, %	Обрезь	16,67																		Обрезь
Среднеквадратичное отклонение																				
σ_s , мм	0,378	0,213	0,260	0,245	0,211	0,218	0,165	0,212	0,178	0,222	0,171	0,191	0,178	0,176	0,162	0,216	0,219	0,235	0,218	0,188

Таблица 41 – Результаты измерений толщины стенки раската за ИКС, изготовленного с использованием системы калибра SMS, плавка № 40468

Номер точки измерения толщины стенки в поперечном сечении раската за ИКС	Номер сечения по длине раската за ИКС																				
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI
1	6,58	5,95	5,91	6,00	5,75	5,89	5,93	5,82	5,87	5,92	5,79	5,78	5,96	5,92	5,84	5,72	5,60	5,70	5,63	5,72	5,89
2	6,72	6,05	6,14	6,23	6,07	6,10	5,89	5,94	5,98	5,98	5,88	5,95	6,05	5,93	5,91	5,79	5,52	5,49	5,60	5,69	5,88
3	6,94	6,08	6,06	6,14	5,97	5,97	5,94	5,96	6,03	5,93	5,84	5,93	5,99	5,89	5,67	5,81	5,59	5,53	5,91	5,71	5,70
4	6,76	5,99	5,63	5,80	5,82	5,71	5,70	5,91	5,84	5,80	5,70	5,70	5,92	5,70	5,82	5,65	5,31	5,45	5,82	5,52	5,51
5	6,86	6,20	5,77	5,89	5,76	5,68	5,77	5,81	5,81	5,73	5,80	5,87	5,85	5,75	5,84	5,70	5,71	5,72	5,97	5,54	5,56
6	6,90	6,31	6,11	6,24	6,04	5,94	5,99	6,04	6,09	5,87	6,09	6,20	6,04	5,99	6,11	6,12	6,04	5,91	6,09	5,86	5,71
7	6,72	6,30	6,19	6,24	6,10	5,92	6,01	6,11	6,17	5,96	6,12	6,16	6,04	6,03	6,00	6,18	6,32	6,25	6,34	6,18	6,03
8	6,35	5,94	5,91	6,01	5,94	5,77	5,72	5,68	5,55	5,50	5,59	5,74	5,54	5,62	5,86	5,68	5,90	5,91	5,98	5,96	5,65
9	6,27	5,92	5,89	5,90	5,70	5,75	5,88	5,72	5,60	5,70	5,81	5,71	5,68	5,77	5,69	5,54	5,89	5,88	5,73	6,01	5,83
10	6,42	6,20	6,20	6,09	5,96	6,03	5,94	6,15	6,03	6,03	6,09	6,05	5,93	6,03	6,10	5,84	6,23	6,21	6,08	6,25	6,27
11	6,61	6,23	6,17	6,01	5,84	6,22	6,29	6,19	6,10	6,12	6,12	6,04	6,10	6,06	6,13	5,89	6,11	6,28	6,12	6,42	6,60
12	6,44	5,85	5,84	5,93	5,61	5,90	6,19	5,75	5,74	5,84	5,75	5,71	5,77	5,86	5,58	5,60	5,87	5,79	5,53	5,74	6,15
	Абсолютная поперечная разностенность по сечениям																				
MIN	6,27	5,85	5,63	5,80	5,61	5,68	5,70	5,68	5,55	5,50	5,59	5,70	5,54	5,62	5,58	5,54	5,31	5,45	5,53	5,52	5,51
MAX	6,94	6,31	6,20	6,24	6,10	6,22	6,29	6,19	6,17	6,12	6,12	6,20	6,10	6,06	6,13	6,18	6,32	6,28	6,34	6,42	6,60
MAX-MIN	0,67	0,46	0,57	0,44	0,49	0,54	0,59	0,51	0,62	0,62	0,53	0,50	0,56	0,44	0,55	0,64	1,01	0,83	0,81	0,90	1,09
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу раската, мм (%)																				
	1,63																				
	Абсолютная поперечная разнотолщинность стенки по всему телу раската без учёта сечений I и XX																				
Обрезь	1,11																				Обрезь
	Разнотолщинность стенки раската по сечениям относительно номинальной толщины стенки готовых труб, %																				
MIN	4,50	-2,50	-6,17	-3,33	-6,50	-5,33	-5,00	-5,33	-7,50	-8,33	-6,83	-5,00	-7,67	-6,33	-7,00	-7,67	-11,50	-9,17	-7,83	-8,00	-8,17
MAX	15,67	5,17	3,33	4,00	1,67	3,67	4,83	3,17	2,83	2,00	2,00	3,33	1,67	1,00	2,17	3,00	5,33	4,67	5,67	7,00	10,00
Общее поле допуска,%	27,17																				
Общее поле допуска,%	Обрезь	18,50																			Обрезь
	Среднеквадратичное отклонение																				
σ_s , мм	0,213	0,152	0,178	0,143	0,150	0,155	0,167	0,165	0,191	0,160	0,173	0,172	0,161	0,136	0,172	0,186	0,292	0,276	0,234	0,273	0,305

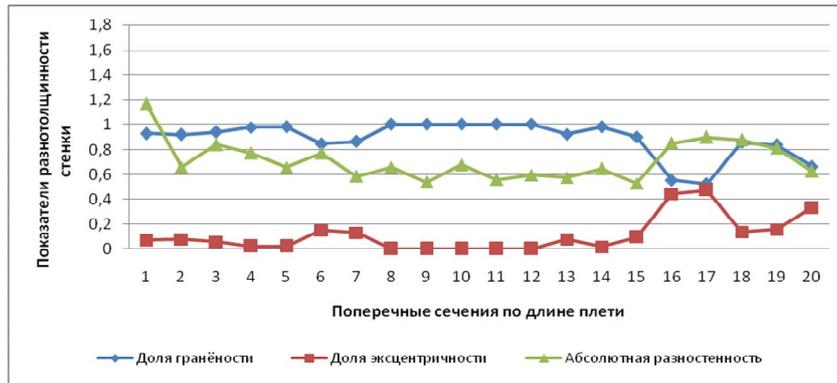


Рисунок 62 – Характеристики точности раската за станом ИКС при прокатке с использованием СК NRD 265 мм

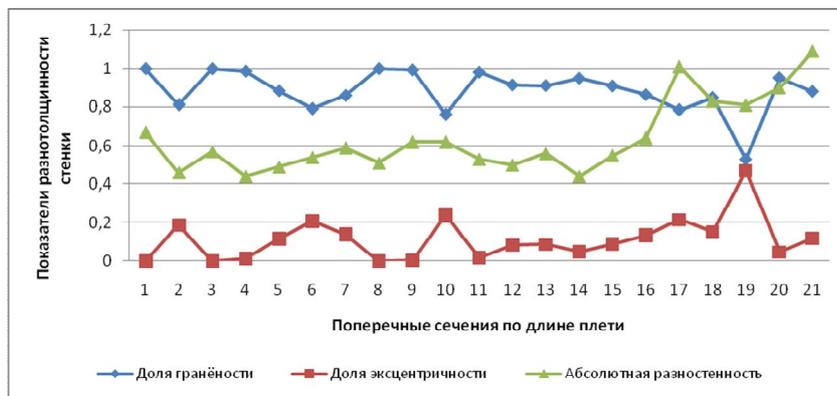


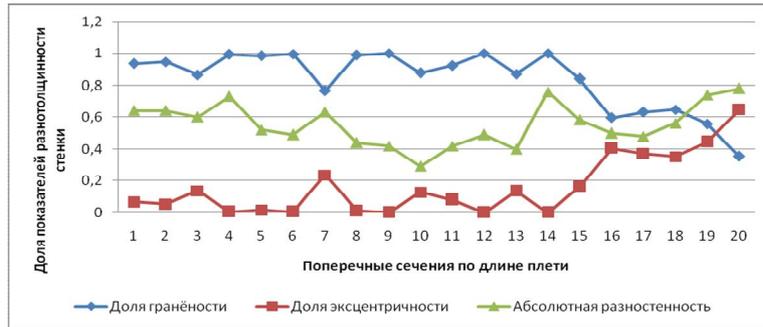
Рисунок 63 – Характеристики точности раската за станом ИКС при прокатке с использованием СК SMS 265 мм

Таблица 42– Разнотолщинность стенки готовых труб

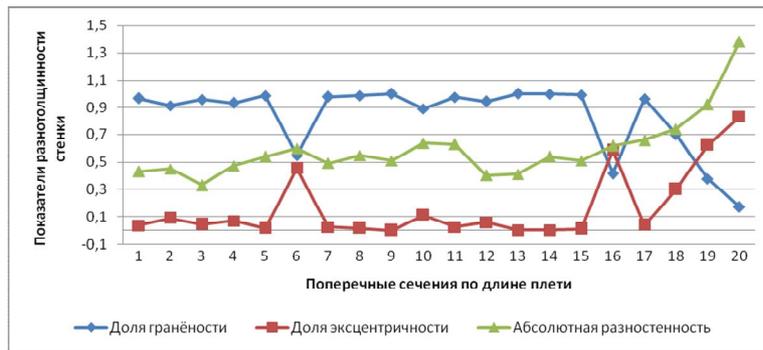
Система калибров	NRD				SMS			
	II							
Номер этапа в соответствии с ходом опытной прокатки	I				II			
№ плавки	40071				40463			
№ трубы	Труба 1	Труба 2	Труба 3	Труба 4	Труба 5	Труба 6	Труба 7	Труба 8
	Толщина стенки готовых труб, мм							
MIN, мм	5,68	5,43	5,74	5,36	5,53	5,08	5,55	5,46
MAX, мм	6,52	6,47	6,47	6,35	6,26	6,46	6,26	6,4
	Абсолютная разнотолщинность готовых труб, мм							
	0,84	1,04	0,73	0,99	0,73	1,38	0,71	0,94
	Разнотолщинность стенки готовых труб относительно номинальной, %							
MIN, мм	-5,33	-9,50	-6,00	-10,67	-7,83	-15,33	-7,50	-9,00
MAX, мм	8,67	7,83	7,83	5,83	4,33	7,67	4,33	6,67
Общее поле допуска, %	14,00	17,33	13,83	16,50	12,16	23,00	11,88	15,67
Расположение труб относительно торцев плети PPC	ПК	ЗК	ПК	ЗК	ПК	ЗК	ПК	ЗК
Плеть за PPC	1		2		3		4	
Длина некондиционных концов за ИКС*	300	410	300	410	300	640	300	640
* -разломаченные концы, не измеряются и подлежат обязательной концевой обрезки на участке пил послышной резки труб (за PPC)								



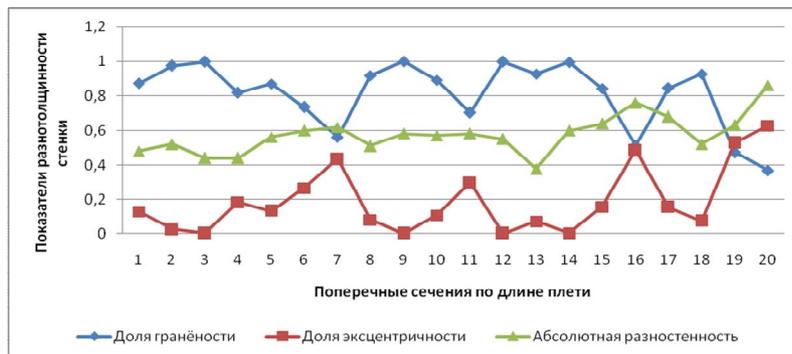
а



б



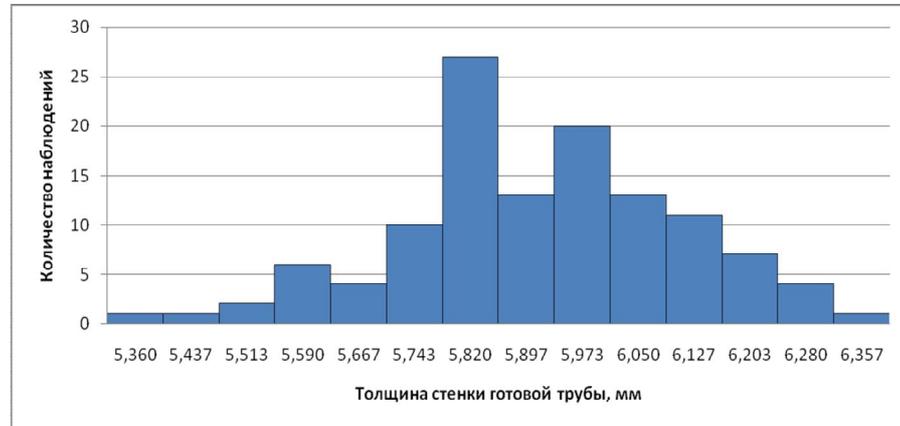
в



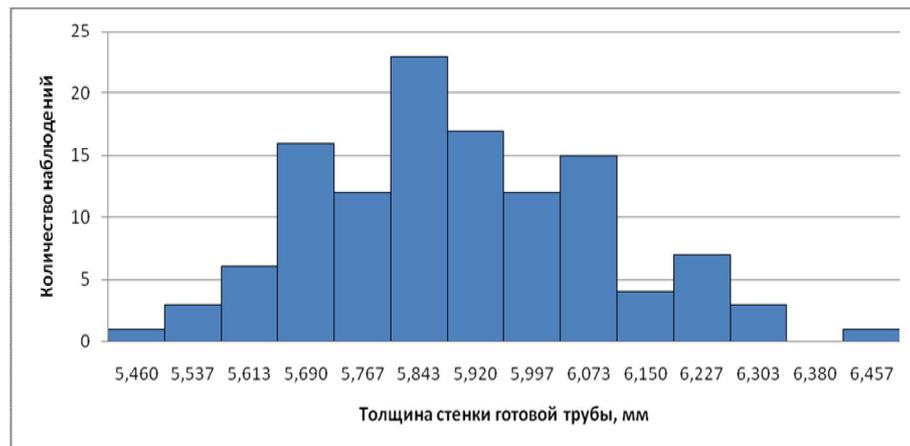
г

Рисунок 64 – Характеристики точности труб при прокатке с использованием СК NRD и SMS 265 мм: а – трубы №1, 2; б– трубы №3, 4; в– трубы №5, 6; г– трубы №7, 8

Частотное распределение толщины стенки на готовых трубах, полученных с использованием СК NRD (труба №4) и СК SMS (труба №8) приведено на рисунке 65.



а



б

Рисунок 65 - Частотное распределение толщины стенки на готовых трубах, полученных с использованием: а - СК NRD (труба №4); б - СК SMS (труба №8)

Частотное распределение толщины стенки готовых труб №4, 8 отлично от нормального закона распределения, соответственно на качество труб значительное влияние оказывало качество гильз и осевой настройки оборудования линии ТПА.

Результаты отбраковки труб, прокатанных в ходе опытно-промышленных исследований (по данным УЗК с 10.02.2014 г. по 11.02.2014 г.), из марки стали 20, по ГОСТ 8731-74 показали, что при использовании СК NRD зафиксировано

снижение брака: по толщине стенки в 1,98 раз; по дефектам внутренней поверхности в 1,35 раз; по дефектам наружной поверхности в 2,3 раза; окончательный брак снизился в 1,63 раза.

При прокатке труб с использованием СК NRD зафиксировано снижение количества брака по сквозным отверстиям не менее чем в 8 раз относительно результатов прокатки с использованием СК SMS.

4.2 Выводы по главе

1. В ходе опытных прокаток с использованием новой СК NRD стана PQF процесс прокатки характеризовался стабильностью с возможностью изменения настроечных параметров стана PQF, удовлетворительными условиями захвата, допустимыми усилиями на валки и токовыми нагрузками на оборудование стана PQF. Показано, что применение нового калибра NRD в первых двух клетях стана в сравнении с действующей калибровкой валков СК 190 мм стана PQF позволяет уменьшить усилия на валки в клетях 2 на 7,31%.

2. Впервые в практике трубопрокатного производства апробирована новая калибровка валков NRD для трёхвалкового непрерывного раскатного стана. Показано, что использование разработанной математической модели расчёта геометрических параметров очага деформации совместно с математической моделью «Program PQF_3R» позволяет произвести оперативный расчёт режимов прокатки для новой СК NRD стана PQF и осуществить безаварийные промышленные испытания СК NRD 190 и 265 мм. В ходе опытной прокатки с использованием новой СК NRD стана PQF 190 мм получены готовые трубы наружным диаметром 168,3 мм, толщиной стенки 8,9 мм повышенной точности с отклонением по толщине стенки $-5,62\% \div +6,74\%$ от номинального значения. Поле отклонений толщины стенки на готовых трубах, полученных с использованием СК NRD уменьшилось в 1,59 раз в сравнении с полем отклонений толщины стенки готовых труб, полученных с использованием СК SMS. Брак по разнотолщинности стенки на готовых трубах, прокатанных по API 5 CT с

использованием СК NRD 190 мм отсутствовал (0,0%), брак по разнотолщинности стенки на готовых трубах, прокатанных с использованием СК SMS 190 мм составил 0,64%, также уменьшилось общее количество брака в 1,36 раз, наружный диаметр всех труб соответствовал требованиям API 5 CT.

3. В ходе опытной прокатки труб марки стали 20, наружным диаметром 219,0 мм, с толщиной стенки 6,0 мм, прокатанных по ГОСТ 8731-74 с использованием новой СК NRD стана PQF 265 мм достигнуто уменьшение брака по разнотолщинности стенки в 1,98 раз, а относительная разнотолщинность стенки готовых труб уменьшилась в 1,33 раза. При использовании СК NRD также зафиксировано снижение количества брака по сквозным отверстиям в 8 раз, длина некондиционных концов уменьшена в 1,56 раз.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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

1. С использованием методов статистической обработки данных исследован характер формоизменения раската по линии ТПА со станом PQF. Произведён анализ технологии, установлена и численно отражена взаимосвязь между характеристиками точности раската по горячему переделу и характеристиками точности готовых труб. Проведено исследование формоизменения раската по клетям стана PQF, определено, что при прокатке в первой и второй клетях имеется переполнение калибров металлом и наблюдается максимальная неравномерность деформаций по периметру калибров. Определена взаимосвязь параметров процесса прокатки с величиной утонения толщины стенки в очаге деформации по линии разъёма валков.

2. Разработана математическая модель расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке труб в трёхвалковом непрерывном раскатном стане, учитывающая изменение зазора между валками и возможность осуществления расчёта для различных видов калибров. Проведена экспериментальная проверка расчётных данных в промышленных условиях, а также с использованием средств компьютерного моделирования, погрешность не превышала 4,05%. Показано, что полученные аналитические зависимости возможно эффективно использовать для анализа и совершенствования технологии продольной прокатки труб, при расчёте режимов деформации и энергосиловых параметров процесса, как на оправке, так и без оправки.

3. Разработана научно обоснованная методика расчёта показателей напряжённого состояния раската при прокатке труб на стане PQF, учитывающая полученные в работе научные результаты и позволяющая оперативно производить анализ калибровки валков, расчёт рациональных режимов обжатий по клетям стана PQF, а также разрабатывать новые научно обоснованные технические решения.

4. Разработана и исследована в лабораторных условиях, а также с использованием средств компьютерного моделирования, новая калибровка валков для черновых клетей стана PQF, установлено, что применение новой калибровки валков в первой и второй клетях стана позволяет уменьшить переполнение калибров, уменьшить брак по разнотолщинности стенки готовых труб и количество дефектов поверхности прокатного происхождения. Рациональность применения новой калибровки валков в первой и второй клетях стана PQF также подтверждена расчётным путём с использованием разработанной методики расчёта показателей напряжённого состояния раската при прокатке на оправке в трёхвалковых калибрах. Усовершенствована калибровка валков чистовых клетей стана PQF, позволяющая уменьшить разнотолщинность стенки на готовых трубах.

5. Впервые в практике трубопрокатного производства апробирована разработанная новая калибровка валков для трёхвалкового непрерывного раскатного стана, позволившая уменьшить брак по разнотолщинности стенки на готовых трубах не менее чем в два раза, уменьшить количество дефектов внутренней поверхности прокатного происхождения не менее чем в 1,35 раз, уменьшить вероятность образования дефекта вида «скворечник». Установлено, что в процессе опытных прокаток с использованием новой калибровки валков стана PQF процесс прокатки характеризовался стабильностью с возможностью изменения настроечных параметров стана PQF, удовлетворительными условиями захвата, допустимыми усилиями на валки и токовыми нагрузками на оборудование.

6. Результаты теоретических исследований, физического и компьютерного моделирования показали высокую сходимость с результатами опытно-промышленного опробования и позволяют совершенствовать технологию продольной прокатки труб на ТПА с непрерывными раскатными станами различного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поляков, М. Г. Деформация металла в многовалковых калибрах [Текст] / М. Г. Поляков, Б. А. Никифоров, Г. С. Гун. – М.: Metallurgy, 1979. – 240 с.
2. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием: учеб. пособие для вузов по спец. "Обработка металлов давлением" и "Оборудование и технология обработка металлов давлением" / ред. Л. А. Барков и др. – Челябинск: Metallurgy Челябинское отделение, 1988. – 304 с.: ил.
3. Выдрин, В. Н. Производство фасонных профилей высокой точности [Текст] / В. Н. Выдрин, А. Б. Гросман, В. К. Павлов, В. С. Нагорнов. – М.: Metallurgy, 1977. – 184 с.
4. Дукмасов, В. Г. Производство точного проката [Текст] / В. Г. Дукмасов, В. Н. Выдрин, О. И. Тищенко. – М.: Metallurgy, 1990. – 168 с.: ил.
5. Гладков, Г. А. Прокатка особо точных профилей [Текст] / Г. А. Гладков, Ф. Е. Долженков, Л. Я. Прищенко. – М.: Metallurgy, 1979. – 215 с.: ил.
6. Блинов, Ю. И. Теоретическое и экспериментальное исследование параметров процесса редуцирования в многовалковых клетях [Текст] / Ю. И. Блинов, А. Н. Ломаченко, Ю. В. Самарянов // Теория и практика редуцирования труб: материалы 3-й научно-техн. конференции, 19–22 мая 1970 г., Днепропетровск / редкол.: Г. И. Гуляев (отв. ред.); отв. ред. И. В. Приходько; Урал. научно-исслед. институт трубной промышленности и др. – Челябинск, 1972. – С. 55–61.
7. Блинов, Ю. И. Конструкция четырехвалковых клетей и регулируемого группового привода редуциционного стана [Текст] / Ю. И. Блинов, А. Н. Ломаченко, Ю. В. Самарянов // Теория и практика редуцирования труб: материалы 3-й научно-техн. конференции, 19–22 мая 1970 г., Днепропетровск / редкол.: Г. И. Гуляев (отв. ред.); отв. ред. И. В. Приходько; Урал. научно-исслед. институт трубной промышленности и др. – Челябинск, 1972. – С. 224–227.

8. Блинов, Ю. И. Продольная прокатка труб в многовалковых калибрах [Текст]. – Челябинск: Металл, 1992. – 239 [1] с.: ил.

9. Выдрин, А. В. Математическое моделирование процесса деформации труб в непрерывном стане и стане-извлекателе при реализации технологии PQF [Текст] / А. В. Выдрин, В. В. Широков, П. А. Мальцев, А. В. Зинченко // Трубы – 2009: труды Международной научно-технической конференции, 21–23 сентября 2009 года, Челябинск, ОАО "РосНИТИ": XVII международная конференция / Российский институт трубной промышленности; Фонд развития трубной промышленности. – Челябинск, 2009. – С. 147–150.

10. Выдрин, А. В. Влияние скоростного и температурного режима процесса редуцирования на продольную разнотолщинность труб [Текст] / А. В. Выдрин, П. А. Мальцев, Д. В. Луценко, А. О. Малкова // Трубы–2010: труды XVIII международной научно-технической конференции, 13-15 сент. 2010 г., Челябинск / Рос. науч.-исслед. институт труб. промышленности, НО "Фонд развития труб. промышленности". – Челябинск, 2010. – С.158–160.

11. Выдрин, А. В. Расчет межклетевых натяжений при прокатке труб в трехвалковом непрерывном оправочном стане [Текст] / А. В. Выдрин, В. В. Широков, С. Б. Верхогляд // Трубы-2010: труды XVIII международной научно-технической конференции, 13-15 сентября 2010 г., Челябинск / Рос. науч.-исслед. институт трубной промышленности, НО "Фонд развития трубной промышленности». – Челябинск, 2010. – С. 161–166.

12. Самарянов, Ю. В. Расчёт площадей поперечных сечений трубы в трёхвалковых клетях непрерывного стана [Текст] / Ю. В. Самарянов, В. В. Широков, В. В. Мульчин, Р. Н. Фартушный, А. В. Поливец // Труды XVI Международной научно-технической конференции "Трубы-2008" / Рос. науч.-исслед. институт трубной промышленности, НО "Фонд развития трубной промышленности". – Челябинск, 2008. – С. 294–298.

13. Лубе, И. И. Исследование и совершенствование технологии горячей прокатки труб из непрерывнолитой заготовки на агрегатах с непрерывным станом

[Текст] / дис. Лубе И. И. канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 26.05.10. – М., 2010 – 147 с.

14. Ершов, Ю. Л. PQF/MPM – особенности проектирования непрерывного оправочного стана [Текст] / Ю. Л. Ершов, Б. И. Тартаковский // Теория и практика металлургии, 2009. – №5–6. – С. 3–14.

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

16. Совершенствование методики расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке бесшовных труб в непрерывных станах с трёхвалковыми клетями [Текст] / А. В. Гончарук, Б. А. Романцев, А. А. Терещенко и др. // Производство проката. – №9. – С. 20–23.

17. Анализ и пути совершенствования процессов горячей раскатки труб [Текст] / Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, В. К. Михайлов, Е. С. Бабина // Сталь, 2002. – № 12. – С. 44–47.

18. Делпано, С. Новый цех по производству бесшовных труб в Казахстане [Текст] / С. Делпано, Л. Бираджи, О. Мышкин и др. // Металлургическое производство и технология, 2005. – № 2. – С. 24–32.

19. Тееллен, Н. Технология PQF для производства стальных бесшовных труб [Текст] / Н. Тееллен, П. Ринальди, Д. Миланезе и др. // Черные металлы, 2005. – № 4. – С. 47–52.

20. Тееллен, Н. Современная технология для производства бесшовных труб на заводе в Тяньцзине [Текст] / Н. Тееллен, П. Ринальди, Д. Миланезе, Я. Цзешен // Металлургическое производство и технология. – 2005. – №1. – С.40–50.

21. Садыков, В. В. Развитие российского рынка труб и металлургического машиностроения / В. В. Садыков, С. Г. Чикалов // Сталь. – 2007. – № 11. – С. 121–124.

22. Chernuschi, E FQMTM: Danieli's 3-roll pass retained mandrel mill for high quality seamless tube production [Электронный документ] / E. Chernuschi // Danieli Centro Tube, Italy. – p.6. – Режим доступа: [http // www.danielicorp.com](http://www.danielicorp.com).

23. Strengthening the competitiveness of seamless tube mills through technological process Control / Dr. Hans Joachim Pehle // MPT International, 2006. – №4. – p. 60–64.

24. Клачков, А. А. Опыт эксплуатации первого в России непрерывного стана с трёхвалковыми клетями PQF 10 ¾” [Текст] / А. А. Клачков // Трубы–2011: труды XIX Международной научно-технической конференции Ч.1. / Рос. науч.-исслед. институт трубной промышленности, НО "Фонд развития трубной промышленности" – Челябинск, 2011. – С. 17–20.

25. Клачков, А. А. Опыт эксплуатации первого в России непрерывного стана с трехвалковыми клетями PQF 10 ¾" в ОАО «Тагмет» [Текст] / А. А. Клачков // Сталь, 2011. – №11. – С.85–88.

26. Гуляев, Ю. Г. Методика расчета скоростного режима непрерывной продольной прокатки труб на длинной оправке [Текст] / Ю. Г. Гуляев [и др.] // Теория и практика металлургии, 2010. – № 3/4. – С. 53–57.

27. Кондратьев, С. В. Настройка положений рабочих валков в клетях непрерывных оправочных станов PQF [Текст] / С. В. Кондратьев, Е. Н. Панюшкин, А. В. Гонтарь, О. М. Кириленко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Днепропетровск, 2011. – №7. – С. 189–194.

28. Kulessa, G. FQMTM: 3-валковый непрерывный стан фирмы Danieli для производства высококачественных бесшовных труб на удерживаемой оправке [Текст] / G. Kulessa // Труды Международной технической конференции «Трубы-Украина 2007». – Днепропетровск, 2007. – С. 108–111.

29. Донец, В. В. Распределение усилий при продольной прокатке труб на короткой оправке в зависимости от формы калибра [Текст] / 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.

30. Патент SU 577059: валок для продольной прокатки труб / авт. Л. К. Багно, С. А. Скромный, Н. С. Кирвалидзе, А. А. Сильченко, Е.С. Гаранин, Б. В. Гнездилов, А. В. Чус, В. Н. Данченко / Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени металлургический институт. – Бюллетень № 39, 1977. – №39. – С. 22.

31. Сериков, С. В. Совершенствование методики расчёта многогранной калибровки валков [Текст] / С. В. Сериков, Ю. М. Иосифов // Всесоюзная научно-техническая конференция «Совершенствование процессов продольной прокатки труб». – Челябинск, 1980. – С. 126–128.

32. Остеренко, В. Я. Усовершенствование калибровки валков автомат. станов [Текст] / В. Я. Остеренко, В. Г. Чус, И. И. Бродский // Обзорная информация института «Черметинформация», 1978. – Серия 8. – Вып. 2. – 19 с.

33. Производство труб на агрегатах с пилигримовым станом [Текст] / О. А. Пляцковский, В. И. Девятисильный, В. П. Полищук // Обзорная информация института «Черметинформация», 1976, сер. 8. – Вып. 2. – 21 с.

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

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

36. Сериков, С. В. Совершенствование методики расчёта многогранной калибровки валков [Текст] / С. В. Сериков, Ю. М. Иосифов // Всесоюзная научно-техническая конференция «Совершенствование процессов продольной прокатки труб». – Челябинск, 1980. – С. 126–128.

37. Остряков, В. В. Определение геометрических параметров калибра многогранной формы [Текст] / В. В. Остряков, Ю. И. Блинов, С. В. Сериков // Трубное производство Урала. – Челябинск, 1975. – Вып. 4. – С. 132.

38. Блинов, Ю. И. Совершенствование профиля калибра автоматического стана [Текст] / Ю. И. Блинов, С. В. Сериков, Ю. М. Иосифов // Производство труб. – М.: Металлургия, 1979. – № 5. – С. 8–11.
39. Шиндлер, К. Производство труб на пилигримовом стане [Текст] / К. Шиндлер // Производство труб: материалы конференции, проведённой Обществом немецких металлургов совместно с Домом техники г. Эссене. – М.: Металлургия, 1980. – С. 56–64.
40. Данилов, Ф. А. Горячая прокатка и прессование труб [Текст] / Ф. А. Данилов, А. З. Балакин, В. Г. Глейберг. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1972. – 576 с.
41. Совершенствование производства горячекатаных труб [Текст] / Г. И. Гуляев, А. С. Коба, Ю. М. Миронов и др. – Киев: Техника, 1985. – 136 с.
42. Матвеев, Б. Н. Горячая прокатка труб: учеб. пособие для вузов по направлениям подготовки дипломированного специалиста по спец. "Металлургия", "Машиностроит. технологии и оборудование" и "Технол. машины и оборудование" / Б. Н. Матвеев. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 142 с.
43. Зимовец, В. Г. Совершенствование производства стальных труб / В. Г. Зимовец; под ред. А. П. Коликова. – М.: МИСиС, 1996. – 480 с.
44. Цикл докладов фирмы Маннесманн Демаг Меер для симпозиума по изготовлению и окончательной обработке бесшовных труб: Т.1 Новые технологии изготовления труб фирмы Маннесманн Меер. – М. 1981. – 62 с.
45. Обработка металлов давлением: учебник для ВУЗов / Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, Н. М. Вавилкин, С. В. Самусев. – М.: МИСиС, 2008. – 960 с.
46. Машины и агрегаты трубного производства: учеб. пособие для вузов по специальности «Обработка металлов давлением» / А. П. Коликов, В. П. Романенко, С. В. Самусев и др.; под ред. А. П. Коликов. – М.: МИСиС, 1998. – 536 с.
47. 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.

48. Технология и оборудование трубного производства [Текст]: учеб. для вузов по специальности "Обработка металлов давлением" / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец, А. П. Коликов; под ред. В. Я. Осадчего. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 560 с.: ил.

49. Матвеев, Б. Н. Новые разработки германских фирм для производства горячекатаных труб / Б.Н. Матвеев // Производство проката. – 2003. – №4. – С. 22–27.

50. Стасовский, Ю. Н. Развитие и использование круглого калибра в непрерывных трубoproкатных станах [Текст] / Ю. Н. Стасовский, О. И. Сокиро, Ю. А. Гладкий // Металл и литьё Украины. – 2010. – № 9/10. – С. 65–69.

51. Гуляев, Ю. Г. Методика расчёта скоростного режима при непрерывной продольной прокатке труб на длинной плавающей оправке [Текст] / Ю. Г. Гуляев, Е. И. Шифрин, Д. Ю. Гармашев, В. В. Бойко, И. П. Бойко, В. С. Олейник, С. В. Кузьмеко // Metallurgical and Iron-ore Industry. – 2011. – №7. – С. 134–136.

52. Гуляев, Ю. Г. Теоретический анализ влияния отклонения скоростного режима и деформационного режимов на изменение условий непрерывной продольной прокатки труб [Текст] / Ю. Г. Гуляев, Е. И. Шифрин, Н. А. Максимова-Гуляева, В. В. Бойко, В. С. Олейник, И. П. Бойко, С. В. Кузьменко // Теория и практика металлургии. – 2012. – №1/2. – С. 37–44.

53. Бородин, Е. М. Математическая модель непрерывной оправочной прокатки труб [Текст] / Е. М. Бородин, В. Л. Колмогоров, М. Ю. Бородин, В. В. Харитонов // Сталь. – 2009. – №10. – С. 71–74.

54. Романцев, Б. А. Методика расчёта кинематических параметров прокатки труб в трёхвалковых клетях непрерывного стана [Текст] / Б. А. Романцев, С. В. Кондратьев, Н. Е. Панюшкин, А. В. Гончарук, Е. Н. Панюшкин // Сталь. – 2014. – №2. – С. 48–50.

55. Оправочный узел непрерывного трубoproкатного стана [Патент] : 2486976 С1 Рос. Федерация: МПК В21В 25/00 (2006.01) № 2011147981/02; заявл. 24.11.2011; опубл. 10.07.2013 / И. Ю. Пышминцев, А. В. Никитюк, А. В. Поливец,

Д. О. Струин.; заявитель и патентообладатель Челябинск. Рос.науч.-исслед. институт трубной промышленности. — Бюл. № 19. — 5 с.: ил.

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

57. Жучков, С. М. Разработка энергосберегающих режимов прокатки на непрерывных станах [Текст] / С. М. Жучков, Д. Г. Паламарь. — М.: Чёрная металлургия. — Бюлетень НТИ. — 2003. — №6. — С.32–33.

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

59. Гуляев, Г. И. Выбор величин уширения при редуцировании труб [Текст] / Г. И. Гуляев, А. И. Довгаль // Сталь. — 1965. — №6. — С. 62–64.

60. Боткин, А.В. Прогнозирование разрушения металла в процессе интенсивной пластической деформации цилиндрической заготовки равноканальным угловым прессованием [Текст] / А. В. Боткин, Р. З. Валиев, С. В. Дубинина, Г. И. Рааб, П. С. Степин // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. — Москва, 2011. — №4.— С. 41–45.

61. Романцев, Б. А. Условия работы перемещаемых с заданной скоростью раскатных оправок непрерывных трубопрокатных станов [Текст] / Е. Н. Панюшкин, С. В. Кондратьев, А. В. Гончарук // Производство проката. — М, 2014. — №3 — С.19–22.

62. Романцев, Б. А. Особенности настройки рабочих клеток стана PQF / Б. А. Романцев, С. В. Кондратьев, Н. Е. Панюшкин, А.В. Гончарук [Текст] // Сталь. — 2013. — №10. — 81–84.

63. Черных, И. Н. Определение величины концевой обрезки труб, формирующейся в условиях ТПА с непрерывными станами типа PQF, FQM [Текст] / И. Н. Черных, Д. О. Струин, Е. А. Шкуратов. — Вестник Южно-

Уральского государственного университета. Сер. Metallургия. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 71–75.

64. Никитюк, А. В. Определение допускаемого износа чистовых калибров непрерывного стана с удерживаемой оправкой [Текст] / А. В. Никитюк, В. И. Лашевич, А. Т. Кутепов, А. В. Король // Трубы–2007: труды Международной научно-практической конференции: XV международной конференции. – Челябинск: РосНИТИ, 2007. – С. 252–254.

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

66. Матвеев, Ю. М. Калибровка инструмента трубных станов [Текст] / Ю. М. Матвеев, Я. Л. Ваткин. – М.: Metallургия, 1970. – С. 193–204.

67. Ваткин, Я. Л. Исследование деформации трубы при прокатке в круглом калибре на длинной оправке [Текст]: 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.: Metallургия, 1967. – 256 с.

68. Швейкин, В. В. Причины образования поперечных трещин на трубах при прокатке в круглом калибре на оправке [Текст] / В. В. Швейкин // Сталь. – 1949. – №3.

69. Чекмарев, А. П. Основы прокатки труб в круглых калибрах [Текст] / А. П. Чекмарев, Я. Л. Ваткин – М.: Metallургиздат, 1962. – 222 с.

70. Чикалов, С. Г. Производство бесшовных труб из непрерывно литой заготовки [Текст] / С. Г. Чикалов. – Волгоград: Комитет по печати и информации, 1999. – 416 с.

71. Li sheng-zhi, Xu Jie, Yin Yuan, Xue Jian-guo, Feng Yuan [Текст] / Mechanism of internal crack formation of seamless modified 9Cr-1 Mo steel tube rolled by mandrel mill and its application / Proceedings of Sino-Swedish Structural Materials Symposium, 2007. – p. 273–276.

72. Данилов, Ф. А. Горячая прокатка труб. [Текст] / Ф. А. Данилов, А. З. Глейберг, В. Г. Балакин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1962. – 615 с.: ил. и схемы.

73. Гульянов, Ю. Н. Рациональная деформация металла в непрерывном стане [Текст] // Ю. Н. Гульянов, О. Э. Нодев, М. Ф. Столетний // Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами: материалы научно-технической конференции 1967 г. – Д.: ВНИТИ, 1968. – С. 83–88.

74. Шевченко, А. А. Опыт калибровки валков непрерывных станов [Текст] / А. А. Шевченко, Я. Л. Ваткин, А. П. Савкин и др. // Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами: материалы научно-технической конференции 1967 г. – Д.: ВНИТИ, 1968. – С. 78–83.

75. Ваткин, Я. Л. Об оптимальном диаметре валков непрерывных станов [Текст] / Я. Л. Ваткин, В. Н. Данченко // Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами: материалы научно-технической конференции 1967 г. – Д.: ВНИТИ, 1968. – С. 106–110.

76. Матвеев, Ю. М. Калибровка валков и инструмента трубных станов [Текст] / Ю. М. Матвеев, Я. Л. Ваткин. – М.: Металлургиздат, 1951. – 412 с.

77. Павлушкин, Г. Н. К вопросу о выборе оптимального диаметра валков непрерывного трубопрокатного стана [Текст] / Г. Н. Павлушкин, П. И. Тетельбаум, Ф. И. Орлов и др. // Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами: материалы научно-технической конференции 1967 г. – Д.: ВНИТИ, 1968. – С. 111–114.

78. Данченко, В. Н. Продольная прокатка труб [Текст] / В. Н. Данченко, А. В. Чус. – М.: Металлургия, 1984. – 136 с.

79. Данченко, В. Н. Развитие теории процессов непрерывной прокатки труб [Текст] // В. Н. Данченко. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – С. 94–133.

80. Тутберидзе, А. И. Энергосиловые параметры и давление в очаге деформации автоматического стана в зависимости от формы и размеров калибра [Текст] / А. И. Тутберидзе Л. Н. Оклея // Труды конференции молодых инженеров трубной промышленности. – М.: Металлургия, 1965. – С. 20–23.

81. Шевченко, А. А. Возможности увеличения производительности непрерывных оправочных станов путем изменения параметров прокатки и перераспределения их по клетям [Текст] / А. А. Шевченко, А. Н. Кириченко // Производство бесшовных труб. – М.: Металлургия. – 1975. – № 2. – С. 35–41.

82. Лавров, П. П. Определение основных параметров при прокатке труб в непрерывном стане на длинной оправке [Текст] / П. П. Лавров // Труды ВНИИМЕТМАШ. – М., 1963. – №8. – С. 193–212.

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

84. Ваткин, Я. Л. Исследование деформации трубы при прокатке в круглом калибре на длинной оправке [Текст] / Я. Л. Ваткин, А. А. Шевченко, Г. И. Гуляев и др. // Обработка металлов давлением: научные труды ДМЕТИ. – М.: Металлургия, 1967. – №53. – С. 169–177.

85. Онищенко, И. И. Теория непрерывной прокатки [Текст] / И. И. Онищенко, П. И. Куценко, А. И. Куценко. – Запорожье: ЗГИА, 1998. – 470 с.

86. Столетний, М. Ф. Точность труб [Текст] / М. Ф. Столетний, Е. Д. Клемперт. – М.: Металлургия, 1975. – 240 с.

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

88. Колбасников, Н. Г. Разработка неразрушающих режимов прокатки стали 08пс с низким соотношением Mn/S [Текст] / Н. Г. Колбасников, В. В. Мишин, И. А. Шишов и др. // Сталь. – 2015. – № 3. – С. 52–59.
89. Жруба, А. С. Новые формы калибров для непрерывной прокатки труб [Текст] / А. С. Жруба, С. А. Скромный, Г. О. Хавкин, А. В. Чус // Сталь. – 1989. – № 8. – С. 68–70.
90. Остренко, В. Я. Исследование и усовершенствование калибровки валков станов продольной прокатки [Текст] / В. Я. Остренко, И. И. Бродский, В. В. Донец // Черметинформация. – Днепропетровск. – 1979. – С. 15–20.
91. Сериков, С. В. Совершенствование методики расчёта многогранной калибровки валков [Текст] / С. В. Сериков, Ю. М. Иосифов // Продольная прокатка труб. – Челябинск, 1980. – С. 126–128.
92. Остряков, В. В. Определение геометрических параметров калибра многогранной формы [Текст] / В. В. Остряков, Ю. И. Блинов, С. В. Сериков // Трубное производство Урала. – Челябинск, 1975. – Вып. 4. – С. 132.
93. Блинов, Ю. И. Совершенствование профиля калибра автоматического стана [Текст] / Ю. И. Блинов, С. В. Сериков, Ю. М. Иосифов // Производство труб. – М.: Металлургия, 1979. – № 5. – С. 8–11.
94. Матвеев, Ю. М. Исследование новой калибровки валков непрерывного стана трубопрокатного агрегата 30–102 [Текст] / Ю. М. Матвеев, Л. И. Зайончик, В. И. Хохряков и др. // Чёрная металлургия: бюл. НТИ. – 1972. – № 21 (689). – С. 46–47.
95. Авторское свидетельство 357012 СССР. Способ прокатки труб на многоклетьевом стане [Текст] / Ю. М. Матвеев, Л. И. Зайончик, В. И. Хохряков и др. // Открытия. Изобретения, 1972. – №33. – С. 16.
96. Овчинников, Д. В. Усовершенствованная калибровка валков непрерывного трубопрокатного стана [Текст] / Д. В. Овчинников, П. Ю. Горожанин, А. Ю. Бодров, Г. А. Орлов, С. Е. Ашканов // Сталь. – 2014. – №9. – С. 50–52.

97. Иванов, И. П. Некоторые особенности деформации металла при прокатке труб в автоматическом стане [Текст] / И. П. Иванов, А. И. Лисицин, А. С. Кагарлицкий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Днепропетровск, 1978. – С. 25–27.

98. Остеренко, В. Я. Деформация трубы при прокатке в круглом калибре на оправке [Текст] / В. Я. Остеренко, А. И. Лисицин, А. Н. Болтанов // *Производство труб*. – Москва, *Металлургия*, 1975. – № 1. – С. 31–38.

99. Ваткин, Я. Л. опережение металла при прокатке труб в автоматическом стане [Текст] / Я. Л. Ваткин // *Научные труды, ДМетИ: Вып. №27*. – Харьков, Москва: *Металлургиздат*, 1951. – 172 с.

100. Каргалицкий, А. С. Повышение точности размера труб при прокатке на непрерывных оправочных станах [Текст] / А. С. Каргалицкий, О. А. Пляцковский // *Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ*. – 1966. – №8. – С.43–45.

101. Ваткин, Я. Л. Бюллетень института «Черметинформация» [Текст] / Я. Л. Ваткин. – 1965. – №20. – С. 48.

102. Чекмарёв, А. П. Известия вузов / А. П. Чекмарёв и др. // *Черная металлургия*. – 1964. – №4. – С.77.

103. Сериков, С. В. Анализ полных и удельных давлений при прокатке труб на непрерывном стане [Текст] / С. В. Сериков // *Производство труб*. – №4. – М.: *Металлургия*, 1978. – С.16–17.

104. Определение давления и натяжения при прокатке труб на непрерывном стане с длинной оправкой / Я. Л. Ваткин, И. Д. Кронфельд, С. В. Рожнов, И. А. Чекмарёв // *Сталь*. – 1956. – № 3. – С. 229–235.

105. Хохряков, В. И. Совершенствование калибровки и улучшение качества труб на семиклетьевом непрерывном стане [Текст] / В. И. Хохряков, Ю. И. Блинов, И. А. Грехов и др. // *Сталь*. – 1974. – №7. – С. 632–633.

106. Гескин, С. А. Прокатка труб точных размеров на непрерывном стане [Текст] / С. А. Гескин, П. В. Савкин // *Сталь*. – 1955. – № 7. – С. 621–626.

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

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

109. Блинов, Ю. И. Методика расчёта многогранной оправки автомат стана [Текст] / Ю. И. Блинов, Ю. М. Иосифов, Ф. Д. Могилевкин, Е. Н. Карпенко // Продольная прокатка труб. – Челябинск. – 1980. – С. 128–130.

110. Вавилкин, Н. М. Особенности исследования теплового и термонапряжённого состояний длинных оправок непрерывного стана при раскатке труб [Текст] / Н. М. Вавилкин, А. В. Красиков // Трубное производство. – 2010. – №8. – С. 25–28.

111. Чикалов, С. Г. Исследование работы технологического инструмента непрерывного стана ТПА 159–426 [Текст] / С. Г. Чикалов, М. М. Фадеев, А. П. Коликов // Сталь. – 1999. – №3. – С. 38–44.

112. Казачков, Б. М. Условия работы свободноплавающей оправки непрерывного трубопрокатного стана [Текст] / Б. М. Казачков. – С. 34–45.

113. Авторское свидетельство 505451 СССР. Инструмент стана непрерывной прокатки труб [Текст] / А. М. Шубик, Ю. И. Блинов, В. П. Бедняков, Э. А. Ровинский // ЦНИИПИ: опубликовано 05.03.1976.

114. Авторское свидетельство 719718 СССР. Технологический инструмент для продольной прокатки труб / А. М. Шубик, О. В. Танцырев, В. И. Ключко, В. В. Остряков, А. М. Меньшиков, В.А. Шементов, Ю.М. Иосифов // ЦНИИПИ: опубликовано 05.03.1980

115. Чекмарев, И. А. Использование геометрической модели очага деформации при исследовании разностенности труб, прокатанных на непрерывных станах [Текст] / И. А. Чекмарев, В. Н. Черный, В. Л. Хмель, Г. Ф. Ефремова // Продольная прокатка труб. – Челябинск, 1980. – С. 183–184.

116. Гуляев, Г. И. Оптимизация процесса прокатки труб на непрерывной установке 30-102 ЮТЗ [Текст] / Г. И. Гуляев, И. А. Чекмарев, В. М. Фридман и др. // Продольная прокатка труб. – Челябинск, 1980. – С. 184–185.

117. Пьянков, Б. Г. Разработка компьютерной модели ТПА со станом FQM для определения степени влияния возмущающих параметров на результаты процесса прокатки [Текст] / 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.

118. Выдрин, А. В. Исследование точности размеров труб, прокатанных на непрерывном стане с плавающей оправкой [Текст] / А. В. Выдрин, В. В. Широков, И. Н. Черных, М. Хвостал // Трубы–2011: труды XIX международной научно-практической конференции г. Челябинск: Ч.2 / Рос. науч.-исслед. институт трубной промышленности, НО "Фонд развития трубной промышленности". – Челябинск, 2011. – С. 44–47.

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

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

121. 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.

122. 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.

123. Анализ калибровки калибра 265 мм и скоростных режимов стана PQF / А. В. Выдрин, А. В. 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.

124. Богатов, А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов: учеб. пособие для вузов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. – 329 с.

125. Струин, Д. О. Методика расчета площади поперечного сечения очага деформации, при прокатке труб в трехвалковых калибрах [Текст] / Д. О. Струин, В. Г. Шеркунов, А. В. Выдрин и др. // Сталь. – 2012. – № 12. – С. 41–44.

126. 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.

127. Анализ методов определения площади отслаивания защитного покрытия при катодной поляризации, приведенных в стандартах: ГОСТ Р 51164-98; ГОСТ 9.602–2005; CAN/CSA Z245.20–10; CAN/CSA Z245.21–10; NF A 49–711 / М. В. Жуков, Ю. В. Прыкина, И. М. Гатауллина, В. Н. Панов // Коррозия территории НЕФТЕГАЗ. – 2011. – №18. – С. 12–16.

128. Серенсен, С. В. и др. Прочность при малоцикловом нагружении. Основы методов расчёта и испытаний [Текст] / С. В. Серенсен и др. – М.: Наука, 1975 – 288 с.

129. Москвикин, В. В. Пластичность при переменных нагружениях. – М.: Издательство МРУ, 1965. – 262 с.

130. Совершенствование процесса периодической прокатки труб / М. В. Попов, С. В. Атанасов, Ю. М. Беликов // Днепропетровск: ООО Независимая издательская организация «Дива», 2008. – 192 с.

131. 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.

132. Друян, В. М. Теория и технология трубного производства / В. М. Друян, Ю. Г. Гуляев, С. А. Чукмасов // Днепропетровск: Министерство образования и науки Украины. Национальная металлургическая академия. 2001. – 544 с.

133. Коновалов, Ю. В. Справочник прокатчика: в 2 кн. Кн. 1 Производство горячекатаных листов и полос [Текст] / Ю. В. Коновалов. – М.: Теплотехник, 2008. – 640 с.

134. Колмогоров, В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.

135. Патент на изобретение, Globe Steel Tubes Co, США «Стан для непрерывной прокатки труб на сердечнике»: № SU43373, 1935г.

136. Патент Kawasaki Steel, Япония, «Method for rolling seamless steel tube by mandrel mill»: JPH02104403, 1990 г.

137. Авторское свидетельство «Валок для продольной прокатки труб», № SU577059, Днепропетровский металлургический институт ордена Трудового Красного Знамени, 1976 г.

138. Авторское свидетельство «Валок для продольной прокатки труб», № SU956080, УралНИТИ, 1982 г.

139. Патент Sumitomo Metals Ind, Япония, «Способ удлинительной прокатки с использованием стана для прокатки бесшовных труб на оправке», № RU2357815, 2006 г.

140. Патент № RU2008108, «Валок для продольной прокатки труб», УралНИТИ, 1992 г.

141. Авторское свидетельство «Калибр для продольной прокатки труб», № SU590023 Челябинский трубопрокатный завод, 1976 г.

142. Авторское свидетельство «Валок для продольной прокатки», № SU682294, 1976 г.
143. Авторское свидетельство «Технологический инструмент для продольной прокатки труб», УралНИТИ, 1981 г.
144. Патент № RU2117540, «Калибровка валков для редукционного прокатного стана», Mannesmann AG, Германия, 1996 г.
145. Авторское свидетельство «Калибр для продольной прокатки труб», № SU1502143, Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения им. А.И. Целикова, 1989 г.
146. Патент № RU2479368, «Прокатная клеть», Kocks Technik GmbH, Германия, 2011 г.
147. Kawasaki Steel, Япония, «Mandrel mill capable of preventing stripping miss»: № CA2071428, 1992 г.
148. Авторское свидетельство «Инструмент стана продольной прокатки труб», № SU1335352, Днепропетровский металлургический институт им. Л. И. Брежнева, 1987 г.
149. Теория трубного производства / И. Н. Потапов, А. П. Коликов, В. М. Друян. – М: Металлургия, 1991. – 424 с.
150. Шкуратов, Е. А. Исследование влияния величины овальности чистовых калибров трёхвалкового непрерывного оправочного стана FQM на формоизменение раската [Текст] / Е. А. Шкуратов, Д. О. Струин, И. Н. Черных, О. Е. Сарафанова, Р. О. Бушин, К. А. Носков, О. А. Панасенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Металлургия. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ. — 2015. – Т. 15, № 3. – С. 139–147.
151. Бородин, Е. М. Разработка математической модели непрерывной раскатки труб на длинной подвижной оправке для задач управления: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук [Текст] / Е.М. Бородин. – Екатеринбург, 2010. – 23 с.

152. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб / Г. И. Гуляев, П. Н. Ившин, И. Н. Ерохин, А. К. Зимин и др. – М.: Metallurgy, 1975. – 264 с.
153. Мижирицкий, О. И. Технологические расчёты в процессах продольной прокатки труб: учеб. пособие / О. И. Мижирицкий, В. В. Харитонов В.В. – Свердловск: издание УПИ, 1991. – 88 с.
154. Правосудович, В. В. Дефекты стальных слитков и проката: справочное изд. / В. В. Правосудович, В. П. Сокуренок, В. Н. Данченко и др. – М.: Интернет Инжиниринг, 2006. – 384 с.
155. 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.
156. Создание комплекса оборудования для исследования и моделирования процессов деформации труб / И. Ю. Пышминцев, А. В. Выдрин, Б. В. Баричко, А. Т. Кутепов и др. // Труды международной научно-технической конференции «ТРУБЫ–2009». – Челябинск: ООО «Полиграф-мастер», 2009. – С. 328–331.
157. Исследование характера износа оправок стана МРМ и пути повышения срока их эксплуатации / С.Н. Мишин, Е.А. Алюшкаев, Д.О. Струин, В.Г. Шеркунов // Материалы 67-й научной конференции. Секции технических наук. – Электрон. текст. дан. (55,5 Мб). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 909-914.
158. Совершенствование методики определения технологических осей непрерывных станов ТПА 159-426 / Д.В. Лоханов, А.В. Никитин, В.В. Ананян, А.Б. Тюняев, А.В. Никляев, А.Г. Ульянов, Б.В. Баричко, И.Н. Черных, Д.О. Струин, Е.А. Шкуратов // Производство проката. – М, 2016. – №1 – С.34–38.
159. Влияние величины овальности чистовых клетей раскатного стана на характеристики точности и формоизменение раската / Е. А. Шкуратов, А.В. Выдрин, Д. О. Струин, И. Н. Черных// *Металлург. Наука, техника, производство*. – 2016. – №1. – С. 75-79.

Приложение А – Калибровка валков стана PQF

Таблица А.1 - Калибровка валков стана PQF

Номер клетки	Эксцентриситет, мм	Угол выпуска, °	½ высоты калибра, мм	½ ширины калибра, мм	Овальность	Радиус галтели, мм	Радиус выпуска, мм	Зазор между валками, мм	Идеальный диаметр валка, мм		Нар. диаметр гильзы, мм
									min	max	
CK SMS 190 мм											
1	3,1	30	99,05	110,07	1,1113	36,1	306,45	16	800	850	222
2	2,05	30	96,6	106,89	1,1065	25,1	295,95	16	800	850	
3	0	32	95,2	106,57	1,1194	29,4	333,2	12	800	850	
4	0	30	95	103,7	1,0916	14,9	261,25	9	690	740	
5	0	30	95	103,7	1,0916	14,9	261,25	9	690	740	
CK SMS 241 мм											
1	4,7	30	125	138,88	1,1110	45,6	367,89	20	850	900	277
2	3,15	30	122,5	135,61	1,1070	32,1	366,1	20	850	900	
3	0	30	120,7	133,98	1,1100	36,3	488,82	15	850	900	
4	0	30	120,5	130,86	1,0860	17,98	302,05	12	690	740	
5	0	30	120,5	130,86	1,0860	17,98	302,05	12	690	740	
CK SMS 265 мм											
1	9,7	29	136,9	153,68	1,1226	74,6	439,8	17	850	900	303
2	4,05	28	134,7	144,87	1,0755	52,5	277,15	17	850	900	
3	0	32	132,7	141,38	1,0654	39,7	225,6	15	850	900	
4	0	30	132,5	138,6	1,0460	16,8	198,75	13	690	740	
5	0	30	132,5	138,6	1,0460	16,8	198,75	13	690	740	
CK SMS 290 мм											
1	4,7	30	149,3	165,86	1,1109	58	461,85	20	850	900	328
2	3,15	30	146,8	162,45	1,1066	41,9	449,85	20	850	900	
3	0	32	145,15	161,18	1,1104	46,4	435,45	15	850	900	
4	0	30	145	157,44	1,0858	23,6	362,5	12	690	740	
5	0	30	145	157,44	1,0858	23,6	362,5	12	690	740	

Приложение В – Новая калибровка валков стана PQF

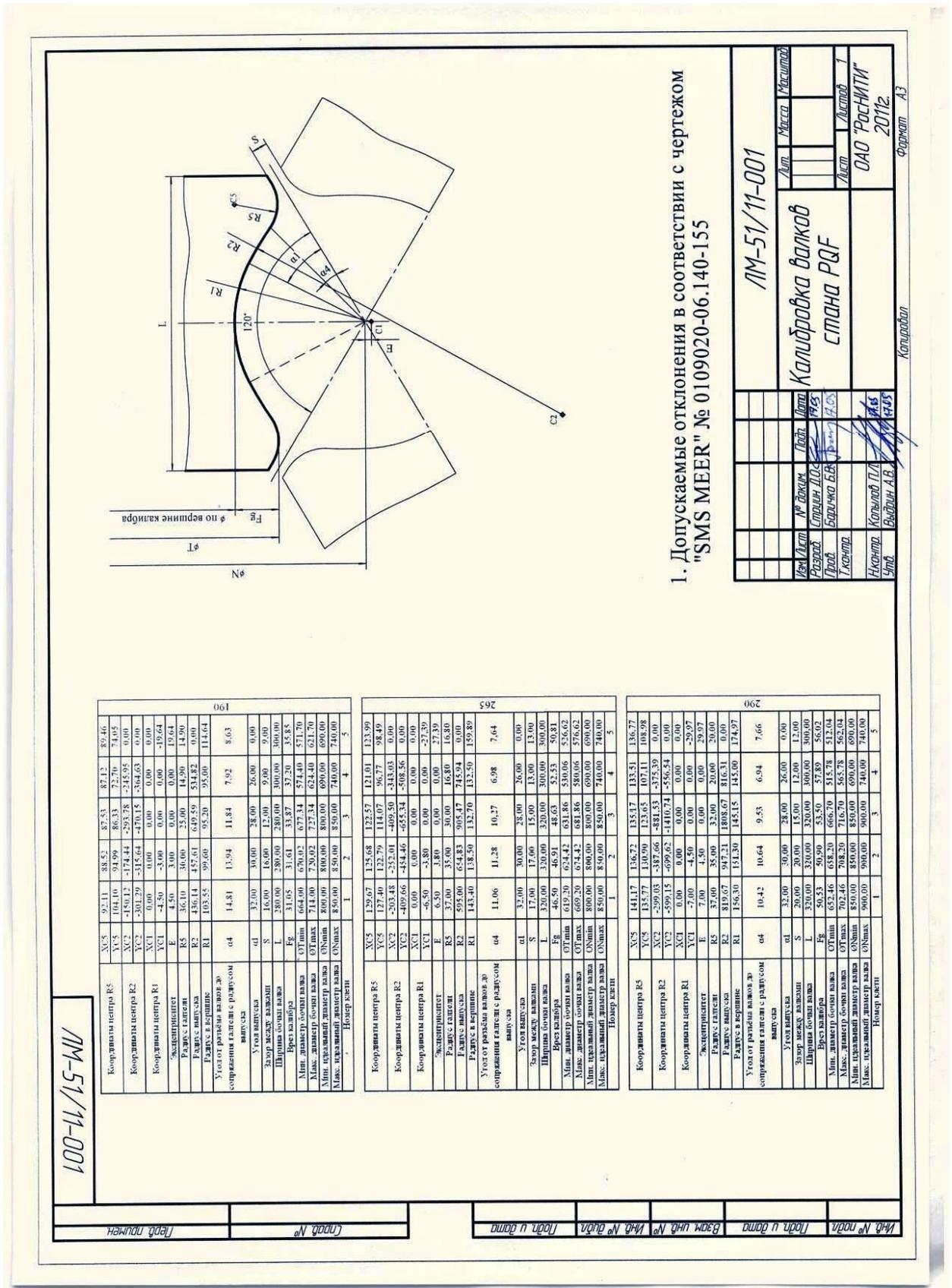


Рисунок В.1– Чертёж новой калибровки валков стана POF (клетки 3, 4 – СК NRD)

Приложение Г – Новая калибровка валков для проведения исследований на ЭУ–ПППТ

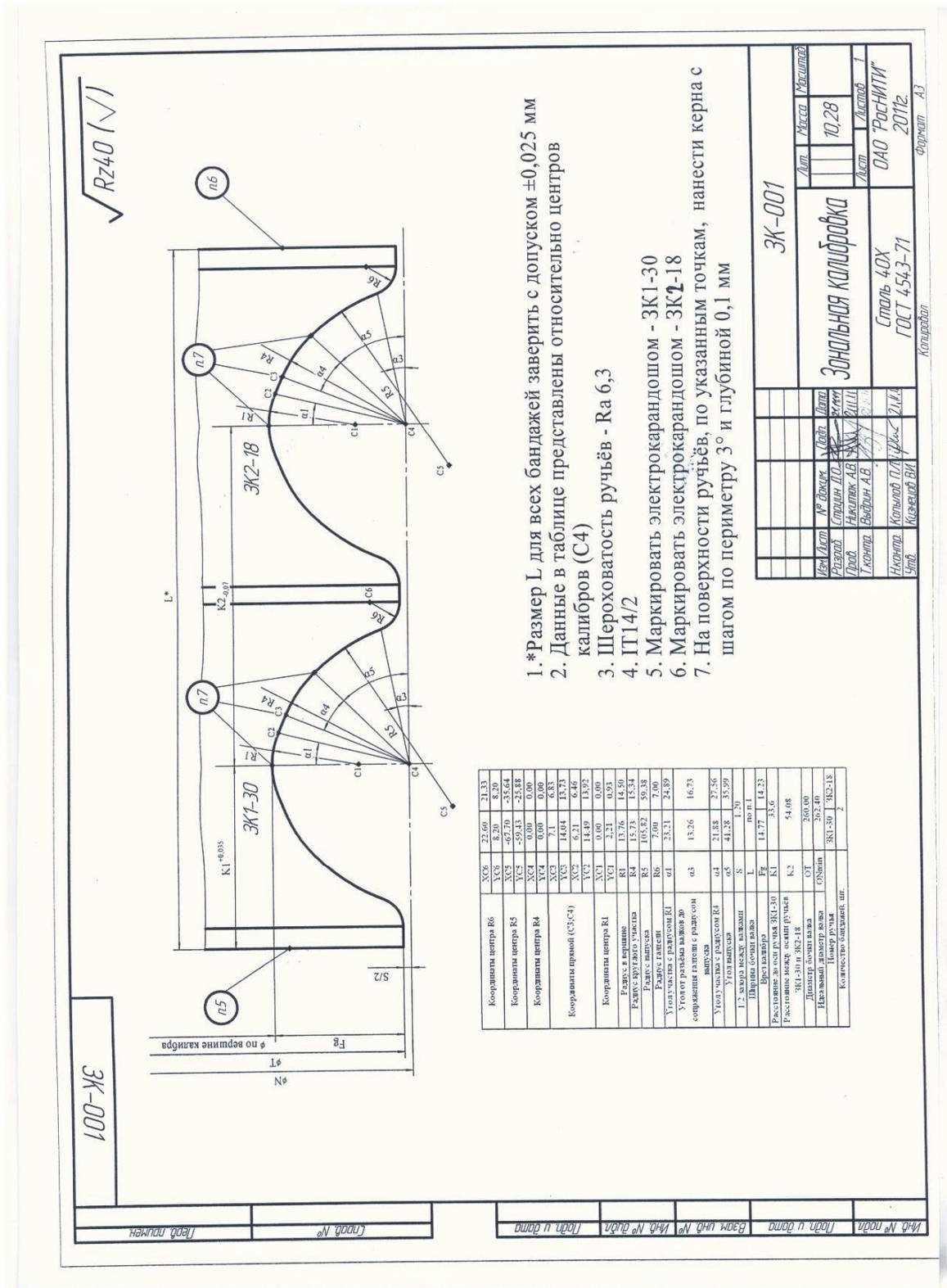


Рисунок Г.1 – Чертёж новой калибровки валков для проведения исследований на ЭУ–ПППТ (калибр NRD)

Продолжение Приложения Г – Калибровка валков для проведения исследований на ЭУ–ПППТ

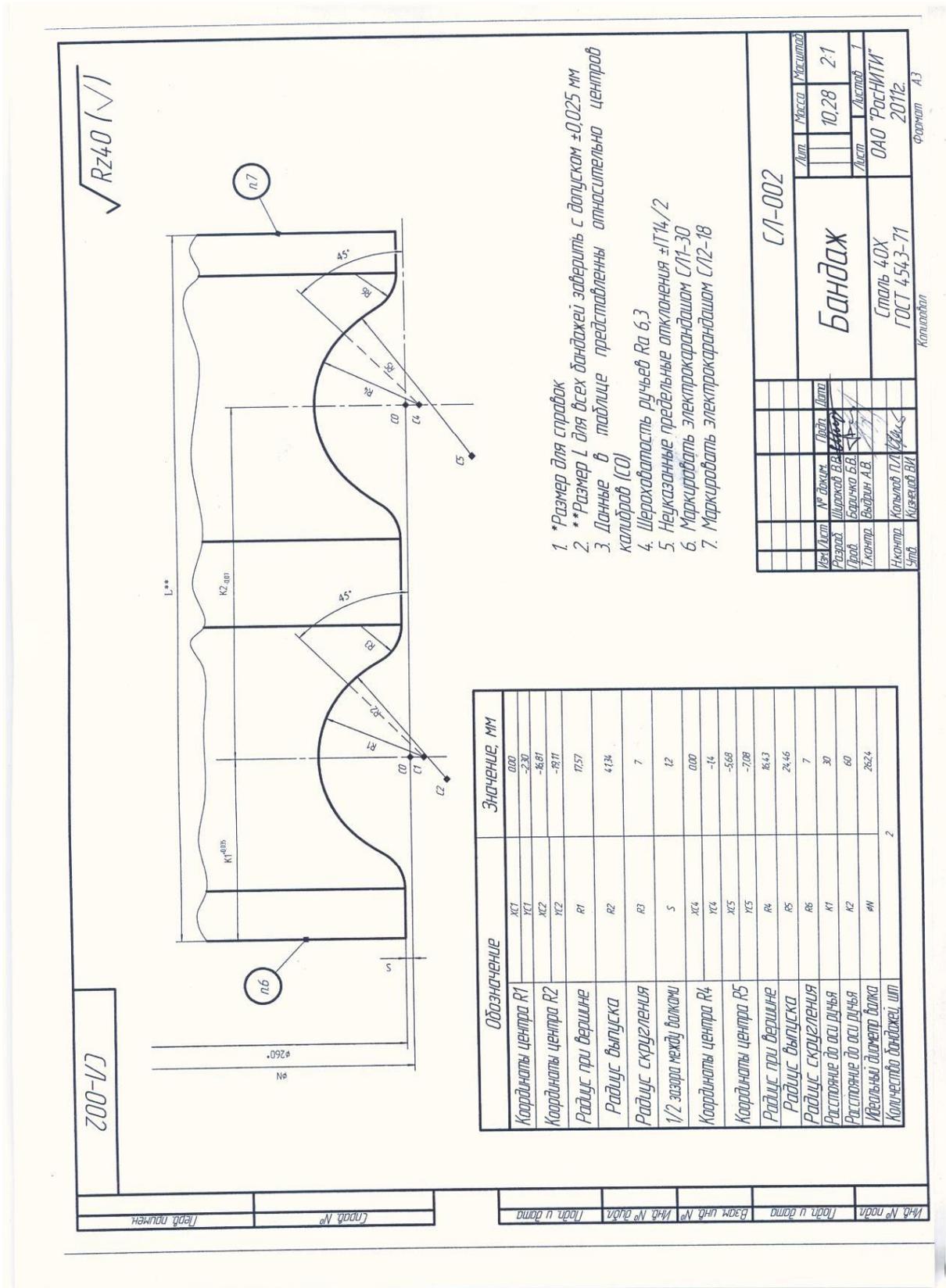


Рисунок Г.1 – Чертёж калибровки валков для проведения исследований на ЭУ–ПППТ (калибр второго вида)

Приложение Д – Акт внедрения математической модели расчёта геометрических параметров очага деформации трёхвалкового непрерывного раскатного стана

УТВЕРЖДАЮ:


 Главный инженер ОАО «ТАГМЕТ», к.т.н.

П.Ю. Горожанин

« 11 » 06 2015 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

математической модели расчёта геометрических параметров очага деформации трёхвалкового непрерывного раскатного стана

В период с 2012 по 2014 г.г. под руководством заведующего лабораторией продольной прокатки ОАО «РосНИТИ» Д.О. Струина совместно со специалистами ИТЦ ОАО «ТАГМЕТ» была выполнена научно-исследовательская работа по анализу и совершенствованию технологии прокатки труб на стане PQF 10 ¾ " ОАО «ТАГМЕТ».

В результате проведения научно-исследовательской работы для трёхвалкового непрерывного раскатного стана разработана новая математическая модель, которая позволяет:

- производить расчёт геометрических параметров очага деформации на выходе из каждой клетки трёхвалкового непрерывного раскатного стана с учётом свода/развода валков при использовании как существующих, так и новых разработанных систем калибров стана PQF 10 ¾ ";
- проводить анализ режимов прокатки труб на стане PQF 10 ¾ " при использовании как существующих, так и новых разработанных систем калибров, а также корректировать настроечные параметры стана PQF 10 ¾ " для новых систем калибров 190, 265 мм перед проведением прокаток.

Проведена экспериментальная проверка расчётных данных, полученных с использованием разработанной математической модели, в условиях ТПЦ ОАО «ТАГМЕТ», которая показала, что результаты расчёта имеют высокую сходимость с фактическими геометрическими параметрами раската по клетям стана PQF 10 ¾ ". Установлено, что разработанная математическая модель в совокупности с математической моделью SMS Meer позволяет корректировать режим прокатки на стане PQF 10 ¾ " для новых систем калибров и исключить риск возникновения аварийных ситуаций в процессе прокатки. Разработанная математическая модель была использована при проектировании новой калибровки валков черновых клетей стана PQF 10 ¾ " для систем калибров 190, 265 мм, которая позволила в период проведения опытно-промышленных прокаток уменьшить брак по разнотолщинности стенки готовых труб не менее чем в два раза и снизить вероятность возникновения разрывов металла по телу труб.

Заместитель главного инженера, к.т.н.



А.В. Зинченко

Начальник трубной лаборатории



В.Л. Нерозников

Приложение Е – Акт о внедрении результатов работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Проректор,
доктор технических наук,
профессор



Радионов Андрей Александрович

июня 2016 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Струина Дмитрия Олеговича в учебный процесс

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе результатов кандидатской диссертационной работы Струина Д.О., выполненной на тему «Совершенствование технологии продольной прокатки труб на основе создания и использования новых научно обоснованных технических решений».

Представленные в диссертационной работе материалы, связанные с определением параметров процесса продольной прокатки бесшовных труб на непрерывном раскатном стане, внедрены в учебный процесс при профессиональной переподготовке специалистов АО «ВТЗ» в 2013-2015 годах по программе «Обработка металлов давлением» (специализации «Трубное производство»), разработанной ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), а также используются в курсе лекций по дисциплине «Теория обработки металлов давлением», входящей в учебный план по направлению 22.04.02 – «Металлургия» Южно-Уральского государственного университета (НИУ).

Заведующий кафедрой «Машины и
технологии материалов давлением»,
д.т.н., профессор

В.Г. Шеркунов

Декан факультета материаловедения
и металлургических технологий,
д.т.н., профессор

Г.Г. Михайлов

Приложение Ж – Акт о внедрении результатов работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Управления развития и

привлечения персонала АО «ВТЗ»



А.В. Никитин А.В. Никитин

« *июль* » 2016 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Струина Дмитрия Олеговича в учебный процесс

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе результатов кандидатской диссертационной работы Струина Д.О., выполненной на тему «Совершенствование технологии продольной прокатки труб на основе создания и использования новых научно обоснованных технических решений».

Представленные в диссертационной работе материалы, связанные с совершенствованием процесса продольной прокатки труб на непрерывном раскатном стане, основанные на создании и использовании новых научно обоснованных технических решений, обеспечивающих снижение разнотолщинности стенки и количества дефектов поверхности прокатного происхождения на готовых трубах, внедрены в учебный процесс при профессиональной переподготовке специалистов АО «ВТЗ» в 2013-2015 годах по программе «Обработка металлов давлением» (специализации «Трубное производство»), разработанной Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.

Заведующий кафедрой

«Машины и технологии обработки
материалов давлением» ЮУрГУ,
доктор технических наук, профессор

В.Г. Шеркунов

Учёный секретарь кафедры

«Машины и технологии обработки
материалов давлением» ЮУрГУ,
кандидат технических наук, доцент

Л.В. Радионова