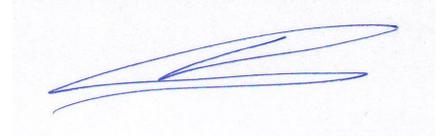


На правах рукописи



Струин Дмитрий Олегович

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Челябинск 2016

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

Научный руководитель: Шеркунов Виктор Георгиевич,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)

Официальные оппоненты:

Богатов Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Буксбаум Виктор Борисович, кандидат технических наук, начальник технического отдела Открытого акционерного общества «Уралтрубмаш», г. Челябинск

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

Защита диссертации состоится 14 декабря 2016 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.01 при ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) и в сети Интернет по адресу:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/struin-dmitriy-olegovich>

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

e-mail: struindo@rosniti.ru, do_struin@mail.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Шабурова Наталия Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Процессы продольной горячей прокатки бесшовных труб на оправке и без оправки широко используются на современных трубопрокатных агрегатах (ТПА). На непрерывном раскатном стане (НРС) обычно прокатывают 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 продольной и поперечной разнотолщинности стенки раската, а также относительная разнотолщинность стенки раската за непрерывным раскатным станом в значительной мере определяют состояние поверхности и точность геометрических параметров готовых труб.

С каждым годом к горячекатаным бесшовным трубам ужесточаются требования, предъявляемые к 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, необходимо учитывать множество факторов и каждую из операций горячего передела, с целью определения влияния каждой из них на геометрические параметры и качество поверхности готовых труб. 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 научно обоснованные технические решения для совершенствования технологии продольной прокатки труб.

Продольная и поперечная разнотолщинность стенки, величина внутренней овальности готовых труб в основном зависят от формоизменения раската по горячему переделу, который взаимосвязан со схемой напряжённо-деформированного состояния раската, зависящей, в частности, от режимов деформации в НРС. Оптимальной следует считать форму калибра НРС, обеспечивающую наиболее равномерное формоизменение металла как в отдельно взятом очаге деформации в *i*-ой клетке, так и для всей системы калибров НРС в целом. Такого результата, например, можно достичь путём увеличения количества валков, образующих калибр, в клетке 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 также разработаны поставщиками оборудования, однако, производителю не всегда удаётся достичь высокой точности геометрических параметров готовых труб в

течение всей прокатной кампании, а на готовых трубах наблюдаются дефекты поверхности прокатного происхождения различного вида. 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:

1. Провести анализ существующей технологии процесса продольной прокатки труб на ТПА с непрерывным раскатным станом с использованием литературных и промышленных данных;

2. Разработать математическую модель расчёта параметров процесса продольной прокатки труб, позволяющую проводить научно обоснованный анализ технологии;

3. Разработать новые научно обоснованные технические решения, обеспечивающие снижение разнотолщинности стенки и количества дефектов поверхности прокатного происхождения на готовых трубах;

4. Провести в промышленных и лабораторных условиях экспериментальные исследования с целью проверки теоретических результатов работы и разработанных технических решений;

5. Выполнить промышленное опробование новых технических решений.

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

1. 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;

2. Впервые получить аналитические зависимости для расчёта геометрических параметров очага деформации при прокатке с использованием различных видов калибров и с учётом изменения зазора между валками;

3. Разработать методику расчёта показателей напряжённого состояния раската, позволяющую определять рациональные режимы прокатки;

4. 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 и частично внедрены на ПАО «ТАГМЕТ». В частности изготовлены валки для новых систем калибров (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 ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ), в учебный процесс обучения технологического персонала УГПТ ТПЦ-1 ПАО «СТЗ» в предпусковой период стана FQM в ноябре 2013 г., а также в процесс обучения студентов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) по направлению «Металлургия» и профилю «Обработка металлов давлением».

Методы исследований и достоверность полученных результатов.

Для исследования процессов продольной прокатки использовалось физическое и математическое моделирование. Экспериментальные исследования проводились в 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 PQF 10 ¾" ПАО «ТАГМЕТ».

Математическое моделирование проводилось с использованием программы QForm, основанной на методе конечных элементов, при этом построение геометрических моделей прокатного инструмента и очагов деформации осуществлялось в САД системе трехмерного твердотельного моделирования

КОМПАС-3D. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными опытно-промышленных испытаний на ПАО «ТАГМЕТ».

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.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 14 печатных работах, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, получено 2 патента РФ на изобретения.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, изложена на 170 страницах машинописного текста, включающего 65 рисунков, 42 таблицы, список использованных источников из 159 наименований отечественных и зарубежных авторов, 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе представлены особенности технологии непрерывной раскатки труб в трёхвалковых калибрах на удерживаемой оправке. Приведены исследования параметров формоизменения раската при прокатке в калибрах на оправке. Проведён анализ влияния геометрических параметров прокатного инструмента на разнотолщинность стенки и вероятность образования дефектов прокатного происхождения на готовых трубах, также выполнена оценка уровня изученности процесса прокатки труб в калибрах на оправке на основании патентных исследований и данных, приведенных в научно-технической литературе.

Установлено, что задачи по совершенствованию технологии продольной прокатки труб на оправке решались авторами: 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 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 с промышленными данными. Установлено, что задачи по совершенствованию технологии продольной прокатки следует решать в комплексе, что позволит уменьшить риск возникновения аварийных

ситуаций в условиях промышленного производства, увеличить положительный эффект от разработанных внедряемых технологических решений.

Во второй главе представлены теоретические исследования процесса продольной прокатки труб. Проведён анализ результатов расчёта параметров процесса прокатки на стане PQF ПАО «ТАГМЕТ» по данным математической модели поставщика оборудования «Program PQF_3R». Установлено, что в описании к расчёту параметров процесса прокатки, предоставленного «SMS Meer», 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.

Установлено, что 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 осуществлять безаварийные опытно-промышленные прокатки труб с использованием различных систем калибров трёхвалкового непрерывного раскатного стана.

Проведён анализ методик расчета площади поперечного сечения очага деформации на выходе из *i*-ой клетки при прокатке труб в трёхвалковых калибрах, приведенных в литературных источниках, который показал, что в результате использования существующих методик расчёта возможна некорректная настройка трёхвалкового непрерывного раскатного стана, а результаты расчётов не подкреплены экспериментальными и промышленными исследованиями.

Разработана математическая модель (ММ) 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 (рисунок 1), погрешность не превышала 4,05%.

В общем виде площадь поперечного сечения очага деформации в обжимных клетях трёхвалкового непрерывного раскатного стана определяется по выражению:

$$F_i = 3 \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_{вер}}^{\frac{\pi}{2}} r_1^2(\varphi) d\varphi + \int_{\varphi_3}^{\frac{\pi}{2}-\varphi_{вер}} r_3^2(\varphi) d\varphi + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\varphi_3} r_4^2(\varphi) d\varphi - \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}+\varphi_7} r_5^2(\varphi) d\varphi - \int_{\frac{\pi}{6}+\varphi_7}^{\frac{\pi}{2}} r_2^2(\varphi) d\varphi \right], \quad (1)$$

а площадь поперечного сечения очага деформации при прокатке с обеспечением зазора между раскатом и оправкой по выражению:

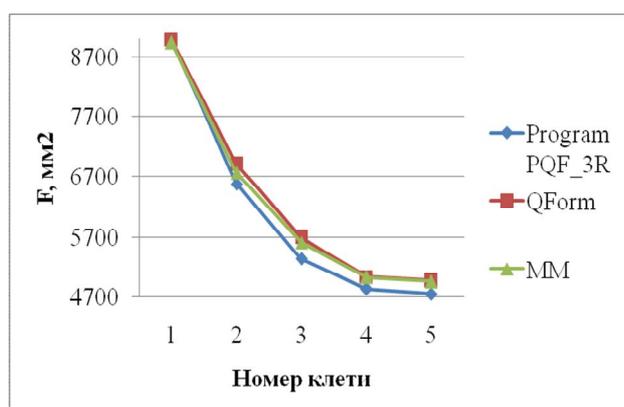
$$F_1 = 3 \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_{вер}}^{\frac{\pi}{2}} r_1^2(\varphi) d\varphi - \int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_{вер}}^{\frac{\pi}{2}} r_2^2(\varphi) d\varphi + \int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_{вер}}^{\frac{\pi}{2}} r_3^2(\varphi) d\varphi - \int_{\frac{\pi}{2}-\varphi_{вер}}^{\frac{\pi}{2}}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

где r_j - уравнения в полярных координатах, описывающие наружный и внутренний профили очага деформации;

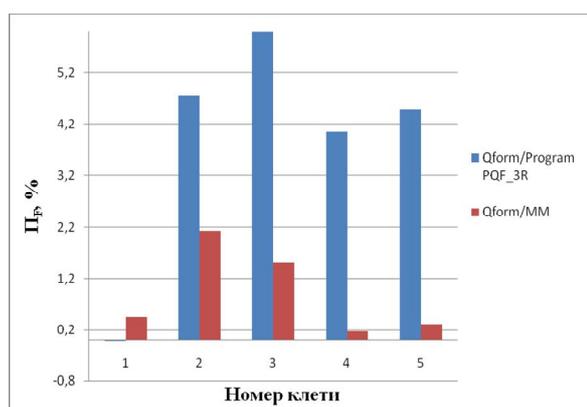
$\varphi_{вер}$ - угол центральной обжимной зоны калибра с учётом сведения или разведения валков, [град];

φ_7 - угол от линии разёма валков до прямой, проведённой из центра калибра и проходящей через точку отхода металла от оправки, [град];

φ_3 - угол от горизонтальной оси до прямой, проведённой из центра калибра до начала линии сопряжения наружного профиля раската по линии разёма валков, [град].



а



б

Рисунок 1 – Сравнение результатов расчёта по разработанной математической модели с результатами расчёта в QForm и «Program PQF_3R»:

а – значение F_1 по клетям стана PQF; б – погрешность при расчёте площади поперечного сечения очага деформации по клетям стана PQF

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 расчётов различных параметров процесса прокатки в трёхвалковых калибрах на оправке в производственных условиях. В этом заключается их преимущество перед программными комплексами типа Deform, QForm.

С использованием методов статистической обработки данных исследован характер формоизменения раската по линии ТПА со станом PQF. Проведён анализ технологии, установлена и численно отражена взаимосвязь между

характеристиками точности раската по горячему переделу и характеристиками точности готовых труб.

Определено, что на гильзах, прокатываемых с использованием прошивного стана с дисками Дишера, преобладает доля эксцентricности, а на раскате за станом PQF наблюдается резкое увеличение доли гранёности, причём она составляет 96-100% при стабильной работе станом ТПА. Установлено, что гранёность, образовавшаяся на стане PQF, распространяется на раскат за извлекательно - калибровочным станом, за редуционно-растяжным станом и на готовые трубы.

Проведено в промышленных условиях 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 толщина стенки по выпуску калибров при прокатке во всех клетях стана PQF утоняется.

Получена зависимость величины утонения и утолщения толщины стенки раската по линии разъёма валков при прокатке труб в калибрах стана PQF 265 и 290 мм от коэффициента «х», установленная на основании результатов исследования недокатов, образовавшихся на стане PQF в процессе раскатки гильз.

Коэффициент «х» рассчитывается по формуле:

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

где S_i, S_{i-1} - толщина стенки раската по вершине калибра в i -ой и $(i-1)$ -ой клетях соответственно, [мм];

θ_i - овальность калибра с учётом сведения или разведения валков относительно номинального значения.

Проведён анализ геометрических параметров калибровки валков стана PQF, спроектированной поставщиком оборудования. Установлено, что геометрические параметры калибровки валков стана PQF не отвечают рекомендациям, известным из практики трубного производства.

Установлено, что высокую сходимость с результатами расчёта частоты оборотов валков стана PQF по «Program PQF_3R» имеет формула:

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

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

$D_{идi}$ - идеальный диаметр валка с учётом настройки стана PQF, [мм];

H_i - высота калибра с учётом настройки стана PQF, [мм];

V_{i-1} - линейная скорость раската на выходе из $(i-1)$ -ой клетки стана PQF, [мм/с].

Расчётным путём определены коэффициенты k_{PQFij} для различных систем калибров стана PQF, погрешность при расчёте частоты оборотов валков в сравнении с промышленными данными не превышает 0,2 %.

Проведена численная оценка неравномерности деформаций (коэффициент М) по периметру очага деформации в клетях стана PQF (рисунок 2).

Коэффициент М рассчитывается по формуле:

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

Коэффициент, характеризующий неравномерность распределения коэффициентов вытяжки по периметру очага деформации, рассчитывается по формуле:

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

где $F_{i\alpha}$ – площадь участка очага деформации в i -ой клетки, ограниченного заданными углами (индекс α), рассчитываемая по разработанной ММ с учётом изменения зазора между валками при использовании различных видов калибров в клетях трёхвалкового непрерывного раскатного стана.

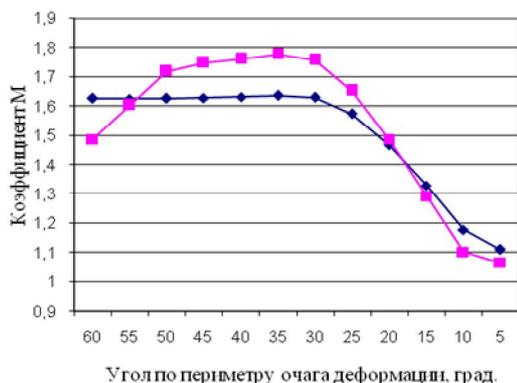
Коэффициент, характеризующий неравномерность окружной скорости валка по периметру калибра в i -ой клетки, рассчитывается по формуле:

$$K_v = V_\alpha / V_{\text{дн}},$$

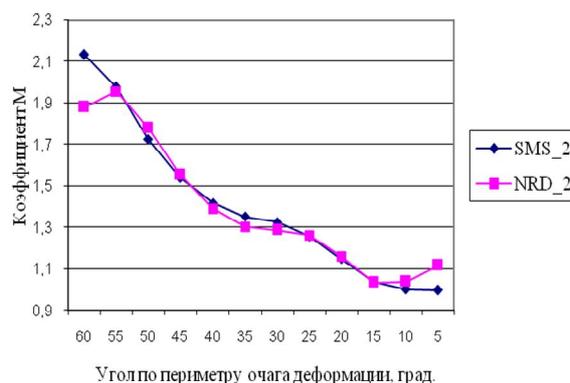
где V_α – окружная скорость валка по периметру калибра в i -ой клетки, [мм/с],

$V_{\text{дн}}$ – окружная скорость валка по дну калибра в i -ой клетки, [мм/с].

На основании результатов исследований и с использованием разработанной математической модели расчёта геометрических параметров очага деформации была спроектирована новая калибровка валков (NRD - new roll design) для черновых клетей стана PQF, использование которой позволяет уменьшить коэффициент неравномерности деформаций по вершине калибра на 15% (рисунки 2, 3).



а



б

Рисунок 2 – График распределения коэффициента М по периметру очага деформации (60° - вершина калибра) в первой и второй клетях стана при прокатке труб наружным диаметром 168,3 мм, с толщиной стенки 8,9 мм с использованием системы калибров стана PQF 190 мм: а - для первой клетки, б – для второй клетки

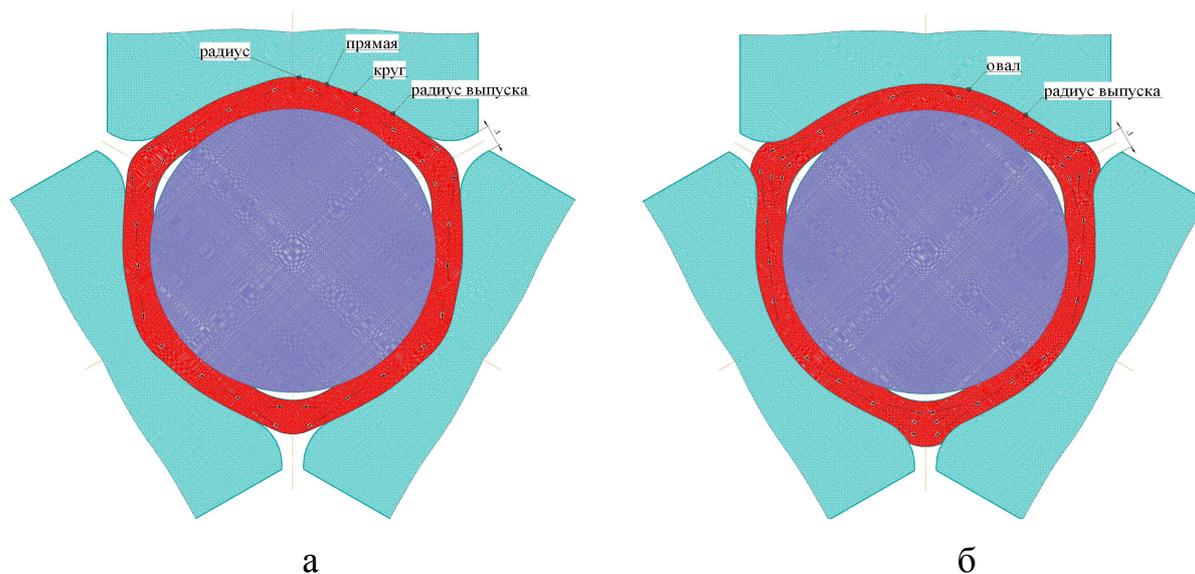
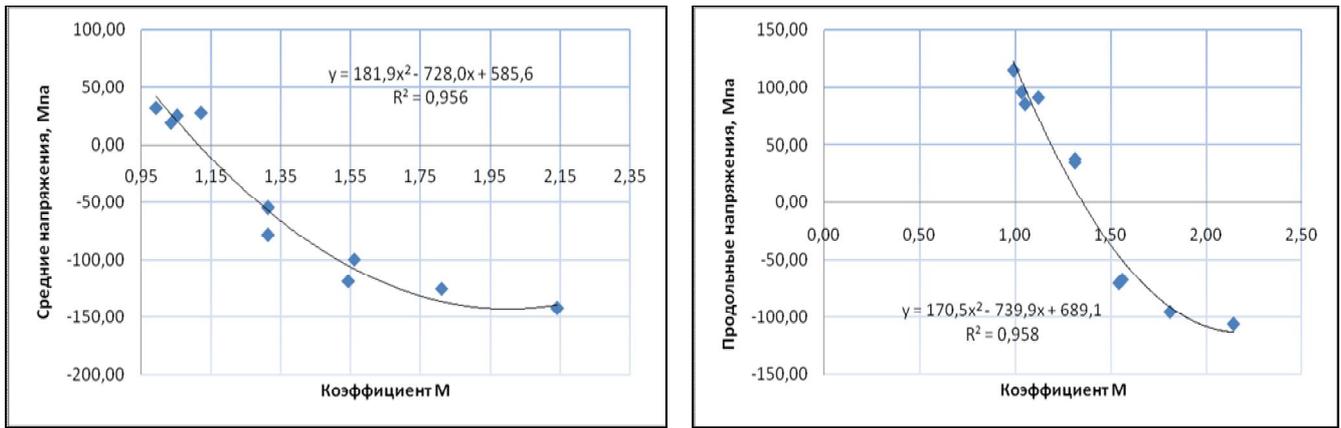


Рисунок 3 – Условный характер формоизменения раската в поперечном сечении очага деформации при прокатке: а – с использованием калибра NRD; б – с использованием калибра с овальной обжимной зоной и выпуском, выполненным по радиусу (калибровка SMS Meer)

В третьей главе представлены результаты лабораторных исследований новой калибровки валков NRD. Установлено, что применение новой калибровки валков NRD в первых двух проходах позволяет уменьшить относительную разнотолщинность стенки прокатываемых патрубков в 1,55 раз, а также уменьшить показатель переполнения калибров: во втором проходе в 20 раз, в третьем и четвёртом проходах не менее чем в 5,55 раз.

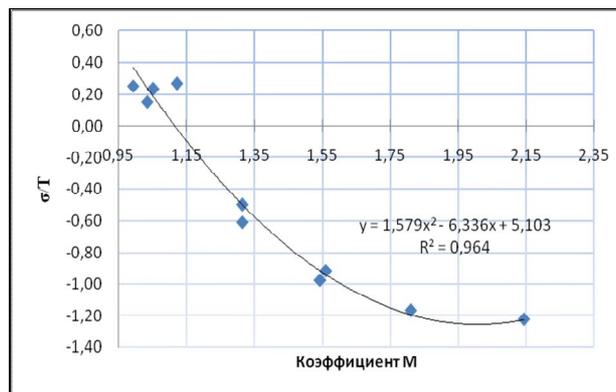
С использованием расчётных значений коэффициента неравномерности деформаций M и результатов моделирования в среде QForm получены уравнения, описывающие взаимосвязь между показателями напряжённого состояния раската и неравномерностью деформаций по периметру калибров, которые позволяют оперативно производить расчёт параметров процесса прокатки и осуществлять рациональную корректировку межвалкового зазора для различных систем калибров трёхвалковых НРС (рисунок 4).

Разработана научно обоснованная методика расчёта показателей напряжённого состояния раската при прокатке труб на НРС (рисунок 5), учитывающая полученные в работе научные результаты и позволяющая оперативно производить анализ калибровки валков, расчёт рациональных режимов обжатий по клетям НРС, а также разрабатывать новые научно обоснованные технические решения.



а

б



в

Рисунок 4 - Графики зависимости средних (а), продольных (б) напряжений, показателя σ/τ (в) от коэффициента М во второй клетке при прокатке труб наружным диаметром 168,3 мм, с толщиной стенки 8,9 мм, марки стали 32Г2А, с использованием системы калибров стана PQF 190 мм



Рисунок 5 – Общая схема методики расчёта показателей напряжённого состояния раската в очаге деформации при прокатке труб на трёхвалковом НРС

С использованием средств компьютерного моделирования исследована 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 непрерывном раскатном стане (рисунок 6).

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 клетей наиболее подвержены разрушению металла в процессе прокатки. Определено, что при использовании новой калибровки валков в первых двух клетях стана PQF, показатели напряжённого состояния раската в клетях 2-5 снижаются от 2,33% до 37,60% в сравнении с калибровкой валков, разработанной SMS Meer.

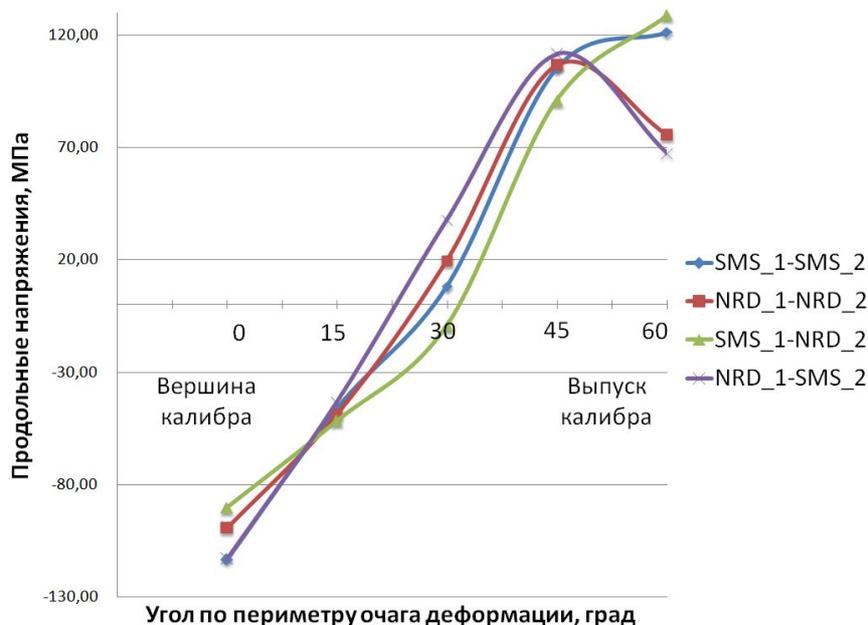


Рисунок 6 – Распределение продольных напряжений по периметру очага деформации во второй клетке при прокатке труб наружным диаметром 168,3 мм, с толщиной стенки 8,9 мм, марки стали 32Г2А с использованием различных калибровок валков в первой и второй клетях стана PQF

По результатам компьютерного моделирования установлено, что использование новой системы калибров NRD позволяет повысить точность раската за станом PQF в 1,66 раз и уменьшить переполнение калибров.

В четвертой главе представлены результаты серии опытно-промышленных прокаток, проведённых в условиях ПАО «ТАГМЕТ» 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.

В двух опытных прокатках впервые в практике трубопрокатного производства апробирована новая калибровка валков NRD для трёхвалкового непрерывного раскатного стана, а также установлено, что использование разработанной математической модели расчёта геометрических параметров очага деформации совместно с математической моделью «Program PQF_3R» позволяет производить расчёт режимов прокатки для новой СК NRD стана PQF и осуществить безаварийные промышленные испытания.

В ходе опытной прокатки с использованием новой СК NRD стана PQF 190 мм получены готовые трубы марки стали 32Г2А, наружным диаметром 168,3 мм, с толщиной стенки 8,9 мм повышенной точности с относительным 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 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.

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.

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.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:

1. 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.

2. 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.

3. 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.: Metallургия. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ. — 2015. – Т. 15, № 3. – С. 139–147.

4. 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.

5. Исследование характера износа оправок стана МРМ и пути повышения срока их эксплуатации / С. Н. Мишин, В. Г. Шеркунов, Е. А. Алюшкаев, Д. О. Струин// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Metallургия. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 125–130.

6. 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// Metallург. Наука, техника, производство. – 2016. – №1. – С. 75-79.

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

1. Новые возможности по физическому и математическому моделированию процессов продольной прокатки труб / А. В. Выдрин, Д. О. Струин, Б. Г. Пьянков, В. В. Широков, А. О. Ашенбрейнер, М. Д. Алютин, Е. В. Храмов // Трубы–2012: труды XX юбилейной научно-практической конференции, Челябинск: Ч 2, 2012. - С. 4-8.

2. 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.

3. Сравнительный анализ процесса оправочной продольной прокатки труб с использованием калибров, образованных разным количеством валков /

А. В. Выдрин, И. Н. Черных, Д. О. Струин, Е. А. Шкуратов, Е. В. Храмков // Трубы–2014: труды XXII научно-практической конференции: Ч.2 – С. 143 –150.

4. Струин, Д. О. Мониторинг точности труб по линии ТПА со станом RQF / 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.

5. Струин, Д. О. Исследование точности проката на ТПА со станом RQF / 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.

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

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Оправочный узел непрерывного трубопрокатного 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.

Подписано в печать «___» _____ 2016 г.

Формат 60x48 1/16
Печать – офсетная.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в _____