

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

БУЛГАНИНА Марина Юрьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ОБКАТКИ ТРУБ НА ТРУБОПРОКАТНОМ АГРЕГАТЕ
С АВТОМАТСТАНОМ**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре «Металлургические и роторные машины» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель доктор технических наук, доцент,
РАСКАТОВ Евгений Юрьевич

Официальные оппоненты: **ПЛАТОВ Сергей Иосифович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский
государственный технический университет им.
Г.И. Носова», г. Магнитогорск, заведующий
кафедрой машин и технологий обработки
давлением и машиностроения Института
металлургии, машиностроения и
материалобработки

НИКИТИН Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
индустриальный университет», г. Новокузнецк,
профессор кафедры механики и
машиностроения Института передовых
инженерных технологий

ОРЛОВ Григорий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор
кафедры обработки металлов давлением
Института новых материалов и технологий

Защита состоится 26 мая 2023 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета УрФУ 2.5.06.15 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Учёного совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=4611>

Автореферат разослан ____ апреля 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Фивейский Андрей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная металлургия достигла больших успехов в повышении производительности и качества металлопродукции благодаря широкому применению бездоменного производства железа, внепечной обработки стали, непрерывной разливки металла, уменьшению доли горячей деформации в цикле пластической обработки. В то же время бурное развитие машиностроения, усложнение и расширение технологических возможностей оборудования, его быстрое моральное устаревание диктуют требования расширения номенклатуры, существенного повышения качества прокатываемых труб и обеспечения специальных физико-механических свойств.

Особое значение расширение производства труб из сталей с повышенными показателями прочности имеет для нефтегазовой промышленности, являющейся одним из основных потребителей горячекатаных труб. Интенсификация процессов добычи энергоносителей на старых месторождениях, а также освоение новых, располагающихся в сложных климатических условиях, требует применения, как новых марок сталей, так и широко распространённых марок, но с улучшенными свойствами за счёт применения современных методов термомеханической обработки, которые позволяют применить продукцию трубопрокатного производства в условиях повышенных давлений, воздействия агрессивных сред, высоких и низких температур, в том числе шельфовых разработках месторождений в Арктике.

Тем самым, освоение производства труб с более высоким уровнем механических свойств обуславливает рост технологических нагрузок при выпуске труб. Отсутствие научно обоснованных режимов деформации для ряда трубопрокатных агрегатов может приводить, с одной стороны к аварийным отказам оборудования, а с другой – к выпуску некондиционной продукции или снижению выхода годного.

В настоящей работе решается проблема выпуска современной высокотехнологичной продукции, а именно труб нефтегазового назначения из сталей групп повышенной прочности, при условии обеспечения работоспособности основного технологического оборудования трубопрокатного производства за счёт научно обоснованного совершенствования техники и технологии прокатки труб на трубопрокатных агрегатах с автоматическим станом и обкатными машинами. В работе решаются проблемы энергосбережения, снижения металлоёмкости, переналаживаемости и управляемости оборудования, расширения номенклатуры выпуска и снижения отходов при прокатке черновой трубы для трубопрокатного комплекса с автоматстаном за счёт совершенствования техники и технологии прокатки и обкатки труб.

Применение исследуемой технологии, например, для производства труб из стали повышенной прочности даёт возможность повышения качества металлопродукции за счёт снижения количества брака, снижения влияния дефектов на концевых участках труб на энергосиловые параметры процесса и выход годного металла, а также уменьшает простой оборудования и тем самым

повышает технико-экономические показатели работы трубопрокатного агрегата в целом.

Степень разработанности темы исследования. Процесс обкатки бесшовных труб на трубопрокатном агрегате с автоматстаном является дискретным и имеет ряд существенных особенностей, отличающих его от сравнительно глубоко теоретически и экспериментально изученных процессов поперечно-винтовой прокатки. В развитие теории поперечно-винтовой прокатки большой вклад внесли такие отечественные учёные как П.Т. Емельяненко, А.П. Чекмарев, Ю.М. Матвеев, В.Н. Выдрин, П.К. Тетерин, Я.Л. Ваткин, Р.М. Голубчик, Б.А. Романцев, А.В. Курятников, А.А. Богатов, Е.И. Шифрин, Д.В. Овчинников, И.И. Лубе, А.Л. Марченко и др.

Говоря о ценности известных работ, следует, однако, отметить, что некоторые положения теории поперечно-винтовой прокатки требуют уточнения, дальнейшего развития и экспериментальной проверки. Не все особенности процесса достаточно изучены, что затрудняет научно обоснованное задание технологических параметров процесса обкатки. Отсутствует методика анализа точности и качества труб при обкатке на основе формоизменения трубы в процессе деформации. Неизвестно решение задачи об объёмном формоизменении при обкатке труб после автоматстана при наличии дефектов геометрии, вызываемых в том числе потерей устойчивости поперечного сечения трубы в условиях горячей деформации при продольной прокатке на короткой конической оправке. Всё отмеченное выше определяет актуальность проведённого автором исследования.

Цель работы: совершенствование технологии обкатки труб и разработка рекомендаций по назначению режимов деформации и использованию дополнительной валковой оснастки для обкатных машин на основе теоретических и экспериментальных исследований процесса поперечно-винтовой раскатки черновой трубы, а также создание научных предпосылок для эффективного использования трубопрокатных агрегатов с автоматическим станом.

Задачи исследования:

1. Разработать трёхмерную модель процесса поперечно-винтовой обкатки бесшовных труб в двухвалковой клетки на конической оправке на основе метода конечных элементов и выполнить многофакторное моделирование в программном комплексе DEFORM-3D.

2. Получить закономерности для энергосиловых параметров процесса поперечно-винтовой обкатки при установившемся течении процесса и при попадании в очаг деформации нового типа продольных дефектов на заднем конце трубы.

3. Выполнить экспериментальное исследование по определению реального уровня нагрузок в рабочей линии обкатного стана на существующей трубопрокатной установке ТПА-220 цеха №1 АО «ПНТЗ».

4. Осуществить сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследования процесса поперечно-винтовой обкатки

бесшовных труб и вывести обобщённые зависимости энергосиловых параметров для оценки уровня нагруженности рабочей клетки и линии привода обкатного стана для произвольного сортамента труб.

5. На основании исследования выдать рекомендации о возможности расширения сортамента прокатываемых труб по группам прочности материалов и максимальным размерам на основе предельных нагрузок для узлов рабочей клетки.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались методы математического моделирования, статистической обработки результатов экспериментов и физическое моделирование процесса обкатки.

Научная новизна и теоретическая значимость работы:

1. Впервые экспериментально и теоретически проанализирован технологический процесс обкатки труб после раскатки на автоматическом стане на обкатных машинах.

2. Выполнено теоретическое и экспериментальное описание процесса попадания новых видов продольных дефектов на трубах для ряда типовых маршрутов прокатки в калибр обкатных машин трубопрокатной установки. Выполнены анализ влияния данных дефектов на ход течения прокатки, оценка энергосиловых параметров процесса.

3. Разработана конечно-элементная модель поперечно-винтовой прокатки труб на конической оправке, согласованная с результатами моделирования деформации на автоматстане и методика спланированного вычислительного эксперимента на базе этой модели.

4. Предложены методики расчёта основных технологических параметров процесса обкатки в зависимости от основных входных факторов, характеризующих геометрию и движение технологического инструмента, настройку клетки обкатного стана, параметры исходных заготовок и получаемого полуфабриката.

5. По разработанной методике вычислительного эксперимента проведён параметрический анализ влияния различных факторов на технологические нагрузки при осуществлении процесса обкатки.

6. Даны оценки температурного режима деформации труб при обкатке и на основе этого определены значения сопротивления металла горячей деформации в диапазоне применяемых при обкатке труб степеней и скоростей деформации.

7. Разработанная математическая модель обкатки труб позволяет широко варьировать начальные и граничные условия задачи, включая геометрию исходной заготовки с выделением зон дефектообразования, полями распределения напряжений, деформаций и температур, учитывать упругопластический характер материала заготовки, различные типы контактного взаимодействия заготовки с прокатным инструментом и окружающей средой.

8. Разработана конечно-элементная модель обкатки труб в объёмной постановке, совмещающая различный характер перемещения прокатного

инструмента с интерпретацией результатов, полученных для моделирования тонкостенных труб при раскатке в клетки автоматического стана и методика вычислительного спланированного эксперимента на базе этой модели.

Практическая значимость работы:

1. Получены новые данные по энергосиловым параметрам процесса, взаимному влиянию параметров на ход течения процесса обкатки труб при наличии и отсутствии продольных концевых дефектов.

2. На основании результатов экспериментального и теоретического исследования сформулированы рекомендации о возможности производства труб расширенного сортамента из сталей групп повышенной прочности.

3. Разработанная оригинальная методика экспериментальных исследований и созданное для этого программное обеспечение позволяет использовать данные мониторинга в производственных условиях токовых и скоростных параметров главных приводов для контроля уровня технологических нагрузок при обкатке труб.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическое описание очага деформации процесса поперечно-винтовой прокатки бесшовных труб в двухвалковой клетки, выполненное в программном комплексе конечно-элементного моделирования, позволяющее оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) с целью получения данных о геометрии заготовки до и после обработки и энергосиловых параметрах процесса.

2. Результаты расчёта полей НДС с определением компонентов тензоров напряжений, деформаций, скоростей деформации с целью получения зависимостей энергосиловых параметров в течение цикла обкатки.

3. Методика комплексной оценки рабочей линии привода обкатного стана для определения реального уровня нагрузок с учётом многообразия действующих факторов для большинства типоразмеров труб и оценки динамических процессов.

4. Аналитические зависимости энергосиловых параметров процесса поперечно-винтовой прокатки труб в двухвалковой клетки от основных геометрических размеров готовой трубы, физико-механических свойств материала трубы и технологических настроек процесса.

Степень достоверности результатов. Достоверность работы обусловлена наличием хорошей сходимости между результатами математического моделирования для нагрузочных характеристик и параметров формоизменения при обкатке труб с результатами обработки экспериментальных замеров в производственных условиях. Для решения вариационных задач применяли программный комплекс конечно-элементного моделирования DEFORM-3D, апробированный для расчёта технологических процессов обработки металлов давлением на многочисленных предприятиях, в отраслевых институтах и университетах в России и мире. При анализе результатов численного моделирования и вычислительного экспериментов использовались методы

статистической обработки.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: Proceedings of the 16th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy, 2021, Proceedings of the III International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering, 2021; International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020; 4th International Scientific and Technical Conference on Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy, 2019, 2020; International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021, 2020; 2nd International Conference on Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering, 2020 и на кафедре «Металлургические и роторные машины» УрФУ в 2022 г.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 7 статей в изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus; 5 статей в российских изданиях и сборниках конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 167 страницах текста, содержит 89 рисунков, 6 таблиц. Список литературы состоит из 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследования; обозначена степень изученности тематики исследования; сформулированы его цели и задачи; показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе выполнен обзор существующих способов производства горячекатаных труб. Специфика трубного передела заключается в том, что процесс деформации металла определяется несколькими последовательными операциями технологического цикла, каждая из которых характеризуется различными схемами напряженно-деформированного состояния. В зависимости от требований к готовой продукции предполагается несколько основных технологических схем, реализованных в трубопрокатных агрегатах, в виде линии последовательной прокатки труб: с автоматическими, непрерывными, пилигримовыми, трёхвалковыми и планетарными раскатными станами винтовой прокатки и реечными станами, названными по способу получения черновой трубы.

Ввиду известных преимуществ ТПА с автоматическим станом обоснованно их широкое применение для производства большой номенклатуры труб: диаметром от 40 до 426 мм с варьированием толщины стенки от 3 до 50 мм и отношением диаметра трубы к толщине стенки $4\div 5 \dots 40\div 50$. Технологические возможности этих агрегатов позволяют выпускать трубы удовлетворительного качества с годовой производительностью до 400 тыс. тонн и расходным

коэффициентом металла 1,06-1,15. Сортамент труб, освоенный на данном производстве, включает трубы из углеродистых, средне- и высоколегированных марок сталей и сплавов, в том числе из коррозионностойких и жаропрочных; по назначению трубы нефтяного сортамента, крекинговые, заготовки для цехов холодного деформирования и др.

Отдельные области применения труб накладывают высокие требования к используемому материалу, в результате чего химический состав стали, а, следовательно, их физико-механические свойства должны отвечать строгим критериям.

Качественные углеродистые стали (например, группы прочности Д) характеризуются более низким, чем у сталей обыкновенного качества, содержанием вредных примесей и неметаллических включений. Они содержат от 0,06% до 0,65% углерода, количество вредных примесей не превышает 0,040% для серы и 0,035% для фосфора.

Конструкционные легированные стали (групп повышенной прочности) в отличие от углеродистых включают химические элементы, позволяющие получить заданные свойства материала. Легирующие добавки дают возможность улучшить механические, физические и химические свойства основного материала. По сравнению с трубами из стали марки Д трубы из легированных сталей обладают большей коррозионной стойкостью и прочностью. В то же время деформационные процессы необходимые для получения труб из данных материалов характеризуется повышенными показателями напряженно-деформированного состояния (НДС) в очаге деформации.

Для линии трубопрокатного агрегата с автоматическим станом выявлены следующие виды дефектов, образующихся на разных стадиях производства: механические повреждения наружной и внутренней поверхности труб в результате использования некачественного технологического инструмента, попадания окалины и других твёрдых инородных материалов на контактные поверхности инструмента и трубы; поверхностные повреждения, связанные с нарушением принятой технологии или неправильно выбранным режимом горячей деформации металла трубы; нарушения внутренней сплошности металла трубы, связанные с особенностями НДС в процессе деформации. При раскатке гильз в автоматическом стане из-за неправильной настройки или повышенного износа инструмента могут возникать дефекты в виде продольных рисков на внутренней поверхности трубы; «скворечники» и поперечные разрывы; вмятины, раковины, бугры, продольные подрезы, заусенцы, усы, бунты, расслоения, трещины на её поверхности. Дефекты в виде продольных швов или бунтов и ужимов образуются из-за переполнения калибров валков, неравномерного износа валков, неудовлетворительной настройки станом.

Трубы, прокатанные на автоматическом стане, могут иметь на внутренней поверхности риски глубиной, достаточной для признания изделия бракованным. Это является большим недостатком процесса прокатки на данном стане, поскольку требует дополнительной обработки трубы на обкатных станах с его переналадкой для повышенных режимов деформации.

Весьма распространённой причиной отбраковывания труб после раскатки в автоматстане является отклонение толщины стенки от номинальных размеров сверх допустимых пределов. Возникновение такого брака может быть вызвано повышенной разностенностью гильзы, задаваемой в автоматстан.

В ходе исследования, выполненного с участием автора, обнаружен новый тип дефекта, характерный для раскатки тонкостенных гильз на автоматическом стане. Гипотеза его появления состоит в том, что стеснённая деформация при раскатке гильзы на автоматическом стане приводит к образованию на задних концах трубы продольных «плавников» переменной высоты, как показано на рисунке 1. При передаче на обкатной и калибровочный станы плавники прижимаются к боковой поверхности трубы и образуют складки, несплошности заднего конца, местные утолщения и ведут к потере устойчивости при деформации. Образование данного дефекта и его попадание в последующие клети сопровождается появлением пиковых нагрузок.



Рисунок 1 – Дефект прокатки: выпуски на задних концах трубы 219×8 – продольные «плавники» переменной высоты

С целью раскатки поверхностных неровностей, продольных рисок на черновых трубах, возникающих в результате износа калибра валков, а также для повышения точности геометрических размеров труб в линии ТПА с автоматстаном применяются обкатные машины.

В технологической цепочке ТПА-220 цеха №1 АО «Первоуральский новотрубный завод» предусмотрено две обкатные машины, на которые с помощью боковой выдачи передаётся черновая труба: №1 – ближе к оси прокатки автоматического стана и №2 – расположенный несколько дальше. Обкатной стан в составе ТПА-220 цеха №1 АО «Первоуральский новотрубный завод», является двухвалковым нереверсивным станом винтовой прокатки с групповым приводом валков.

Поперечно-винтовая прокатка относится к наиболее сложным в теоретическом плане процессам обработки давлением, отличается пространственным характером течения, при котором внешние и внутренние контуры материала в очаге деформации являются сложными поверхностями, вид которых изменяется во времени. Экспериментальные работы показали, что усилия на валки при поперечно-винтовой прокатке зависят от ряда технологических факторов: температуры процесса, геометрии заготовок, размера инструмента и его калибровки, скоростных условий прокатки (связанных с осевым и тангенциальным скольжением заготовки в калибре), а также величины и характера деформации, зависящих как от величины обжатия, так и позиционирования прокатного инструмента.

В то же время процесс обкатки бесшовных труб на трубопрокатном агрегате с автоматстаном является дискретным и имеет ряд существенных особенностей, что требует собственной объёмной постановки задачи и последующего варьирования исходных параметров. Существующие аналитические решения для процессов поперечно-винтовой прокатки не позволяют учесть множество факторов, связанных с искривлённой геометрией заготовки и их влиянием на параметры процесса.

Во второй главе на основании анализа известных методов теоретического исследования процессов обработки металлов давлением для решения задачи по определению параметров технологического процесса поперечно-винтовой прокатки полой заготовки на короткой оправке выбран метод конечных элементов (МКЭ) в связи с обширными возможностями по решению задач определения НДС твёрдого тела. Согласно этому методу, область решения дискретизируется на конечные элементы, для которых задаются физико-механические свойства материалов инструмента и заготовки, начальные и граничные условия. Полученная затем система линейных дифференциальных уравнений решается прямым или итерационным методом. Для решения задачи применяется программный комплекс, в котором реализуется МКЭ.

Расчётная схема технологического процесса обкатки состоит из заготовки, бочек обкатных валков (далее – валки), стабилизирующей оправки стана и направляющей проводки. Деформация осуществляется за счёт обкатывания валками заготовки на конической оправке. Очаг деформации состоит из зоны между поверхностью контакта валков с трубой, трубы с оправкой и зоны соприкосновения трубы с проводкой и оправкой, а также внеконтактных зон.

Валки устанавливаются наклонно к оси заготовки на угол подачи с межвалковым расстоянием по калибру трубы. Процесс рассматривается от момента задачи в калибр стана черновой трубы, полученной после автоматического стана, до момента полного снятия обкатанного конца трубы с оправки (при достижении значений прокатных усилий и моментов нулевых показателей). Расчётная схема процесса обкатки представлена на рисунке 2.

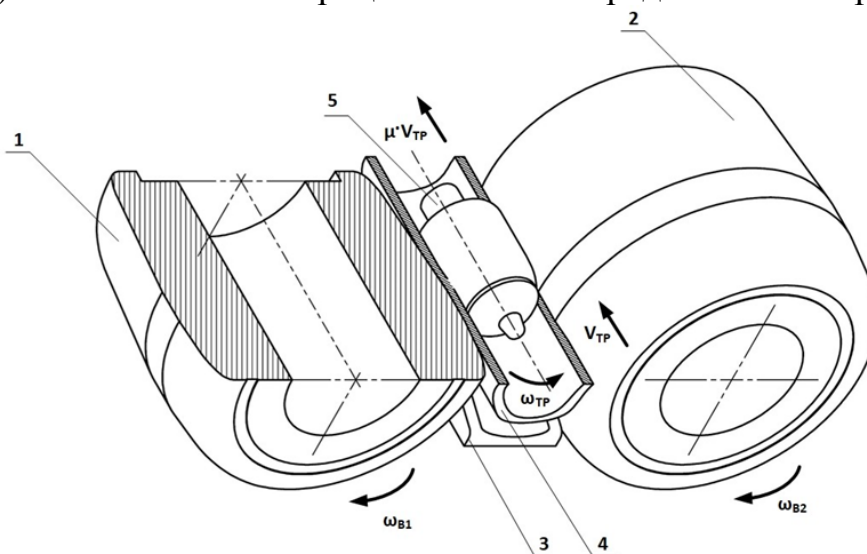


Рисунок 2 – Схема процесса обкатки: 1, 2 – валки обкатного стана; 3 – направляющая проводка; 4 – труба; 5 – оправка

Сетка конечных элементов для трубной заготовки была получена из решения задачи предыдущей операции (раскатки полой гильзы на автоматическом стане в два прохода). Для описания концевых дефектов («плавников») КЭ в местах наибольшего их проявления применено сгущение сетки. Заготовка рассматривается как упруго-пластичное тело, а объекты, выполняющие роль инструмента, принимаются абсолютно жёсткими, ввиду малости деформаций и отсутствия обжатия трубы по толщине стенки валками и оправкой.

Для упругого участка диаграммы свойств материала задаётся линейная модель согласно обобщённому закону Гука:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C} \boldsymbol{\sigma},$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}$ – матрица деформаций;

$\boldsymbol{\sigma}$ – матрица напряжений;

\mathbf{C} – матрица упругой податливости элемента: задаётся как функция от температуры.

Для пластического участка диаграммы свойств материала требуется учитывать интенсивность деформаций, а также интенсивность скоростей деформации и температуру объекта:

$$\sigma_s = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T),$$

где σ_s – сопротивление деформации;

ε – степень деформации;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации;

T – температура.

В векторной форме множество скоростей в узловых точках определяется как:

$$\mathbf{V}^T = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_N\},$$

где T – индекс, обозначающий транспонирование;

N – произведение общего числа узлов на число степеней свободы, приходящееся на один узел.

Для реализации расчётной схемы на базе конечно-элементной формулировки с применением вариационных принципов используется основное уравнение вида:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \xi_{ij} dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0,$$

где σ_{ij} – тензор напряжений;

F_i – усилие, действующее на поверхности;

V – объём области;

S – поверхность области;

S_F – поверхность, на которую действуют усилия;

δu_i – произвольная вариация допустимой скорости перемещения;

$\delta \xi_{ij}$ – вариация тензора скоростей деформаций в зависимости от δu_i .

Для решения уравнения требуется задание граничных условий. Смешанные граничные условия задаются в связи со сложностью задания

граничных условий одного из видов на поверхностях всех объектов расчётной схемы.

Закон действия сил внешнего трения на поверхности контакта инструмента с металлом задан в виде:

$$\tau = \psi \tau_S,$$

где τ – касательное напряжение;

τ_S – предел текучести материала при сдвиге;

ψ – показатель трения по Зибелю: $\psi = 0 \dots 1$.

Условием перехода от упругих деформаций к пластическим является условие Губера-Мизеса, при котором интенсивность касательных напряжений достигает предела текучести материала на сдвиг.

В матричном виде система основных уравнений, составленных для каждого узла, имеет вид:

$$\mathbf{K} \Delta \mathbf{v} = \mathbf{f},$$

где \mathbf{K} – матрица жёсткости КЭ;

\mathbf{f} – усилия в узлах КЭ;

$\Delta \mathbf{v}$ – величина изменения скорости в узлах.

Для задач ОМД уравнение жёсткости нелинейно и решается с помощью метода итераций Ньютона-Рафсона. Процесс нахождения решения считается завершённым, если

$$\left| \frac{x_{n+1} - x_n}{x_n} \right| \leq \Delta$$

где Δ – заданная точность решения.

В третьей главе рассмотрен алгоритм задания математической модели в программном комплексе DEFORM, базирующемся на применении МКЭ, описаны принципы компоновки расчётной схемы, условия разбиения области решения КЭ с учётом свойств объектов схемы и особенностей их геометрии, задание свойств материала заготовки, параметров решателя и настройки вывода результатов моделирования. Компоновка расчётной схемы процесса представлена на рисунке 3.

Для проведения параметрического анализа выбраны пять диаметров труб, выпускаемых на ТПА-220 с различным профилем трубы и калибровками инструментов, исходя из рекомендаций ведения процесса обкатки черновых труб после автоматического стана для условий реального производства.

В качестве параметров при исследовании процесса обкатки принимали: температуру трубной заготовки от 850 °С до 1100 °С, материал сталь 45 (аналог – AISI-1045), коэффициент трения между заготовкой и валками 0,5, между заготовкой и оправкой, заготовкой и проводкой коэффициент трения 0,2. Расчёт каждого типоразмера трубы проводился при нескольких значениях скорости подачи трубной заготовки в валки с коэффициентом осевого скольжения 0,5...1. Скорость обкатки (вращения) валков при расчёте принята 0,5 с⁻¹, угол подачи валков установлен 7,5°.

В результате параметрического анализа процесса поперечно-винтовой прокатки полых заготовок в двухвалковой клетки обкатного стана произведена оценка формоизменения металла трубы для стадий захвата заготовки,

установившегося режима обкатки и выхода трубы из стана, при котором в калибр попадают поперечные дефекты в виде «плавников», показаны реальные очертания очага деформации и его увеличения в случае раскатки задних поперечных дефектов, которые сопровождаются скачкообразным ростом энергосиловых параметров процесса.

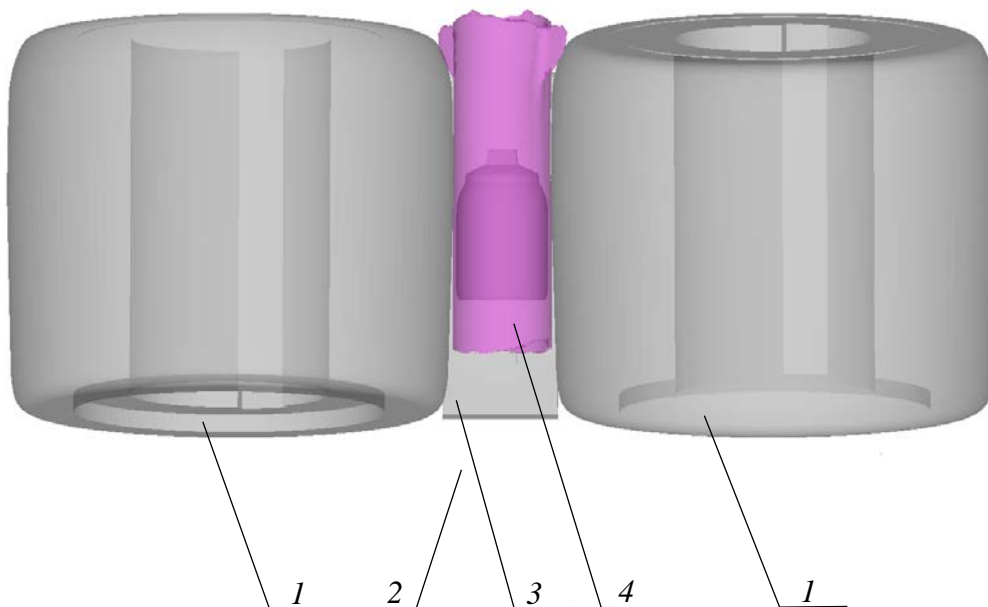


Рисунок 3 – Геометрическое расположение инструмента и обкатываемой трубы:

1 – валок; 2 – направляющая проводка; 3 – труба;
4 – оправка (расположена внутри трубы по оси)

Исследование энергосиловых параметров процесса обкатки трубы после автоматического стана позволило оценить влияние технологических параметров и геометрии заготовки на величину усилия прокатки, осевого усилия и момента прокатки, как при установившемся режиме прокатки, так и при раскатке концевых дефектов. Построены зависимости энергосиловых параметров от профиля трубы (соотношения диаметра трубы к толщине стенки) для случаев стационарной стадии, раскатки концевых дефектов, а также случаев заклинивания оправки внутри трубы при раскатке. Выполнена оценка максимального роста усилий для каждого рассматриваемого типоразмера. Установлена зависимость поведения энергосиловых параметров для различного сортамента труб. Произведена количественно-качественная оценка роста параметров в стационарной стадии и их всплеску при раскатке дефектных концов трубы. Определено усилие толкателя, необходимое для захвата трубы.

Оценка усилия прокатки и момента прокатки для выбранного диапазона типоразмеров труб представлены в таблице 1, в которой $\varepsilon = \frac{F_p - F_a}{F_a}$ – степень деформации заготовки, где F_p , F_a – площади поперечного сечения трубы после риллингования и автоматстана соответственно; $M_{уст}$, $P_{уст}$ – средние величины момента и усилия прокатки в установившемся режиме соответственно; $k_m = \frac{M_{max}}{M_{уст}}$; $k_p = \frac{P_{max}}{P_{уст}}$ – коэффициенты, учитывающие рост нагрузок при обкатке

концевых дефектов, где M_{max} , P_{max} – максимальные значения момента и усилия прокатки при обкатке концевых дефектов.

Таблица 1 – Результаты измерений энергосиловых параметров процесса обкатки

Размер готовой трубы	Степень деформации, ε	$M_{уст}$, кН·м	k_m	$P_{уст}$, кН	k_p
159×4,5	0,013	10,9	4,1	55,6	2,6
159×5		9,4	3,9	41,9	2,7
159×5,5		8,9	3,4	46,1	2,7
159×7		11,1	2,6	50,2	2,2
159×7,5		12,8	2,4	54,6	2
168×5	0,012	10,2	3,6	65,7	2,2
168×5,5		8,6	3,7	62,5	2,1
168×6		7,8	3,6	60,9	2
168×7		8	3	61,3	1,9
168×8		9	2,5	63,4	1,8
194×6	0,01	11,2	2,7	79,1	2,3
194×6,5		10	2,8	75,2	2,3
194×7		9,3	2,9	73	2,2
194×8		9,4	2,5	73,4	2,1
194×9		10,1	2,2	76	2
219×6	0,009	12,7	2,7	187	1,3
219×7		8,8	3,3	167,1	1,2
219×8		8,3	3,3	155,5	1,2
219×9		8,4	3,1	149,5	1,2
219×10		9,1	2,8	146,7	1,1
245×7	0,008	14,2	3,9	117,2	2,3
245×8		9,9	4,6	111,5	2,1
245×9		8,8	4,6	109,8	1,9
245×10		9,9	3,9	110,9	1,8
245×12		14	2,9	115,8	1,7

В четвертой главе представлены результаты эксперимента, выполненного на реальном производстве на трубопрокатной установке ТПА-220. Объектами экспериментального исследования являлись обкатные машины №1 и №2 в составе ТПА-220 цеха № 1 АО «ПНТЗ»: двухвалковые нереверсивные станы винтовой прокатки с групповым приводом валков.

Для оценки уровня нагруженности линии обкатной машины используется замер реального уровня нагрузок, снимаемого с электродвигателя машины, а также измерение деформации промежуточных элементов в линии привода при передаче вращения на рабочие валки. Принципиальная схема измерения и

регистрации нагрузочных параметров, возникающих в линиях приводов рабочих валков обкатного стана ТПА-220 при прокатке, показана на рисунке 4.

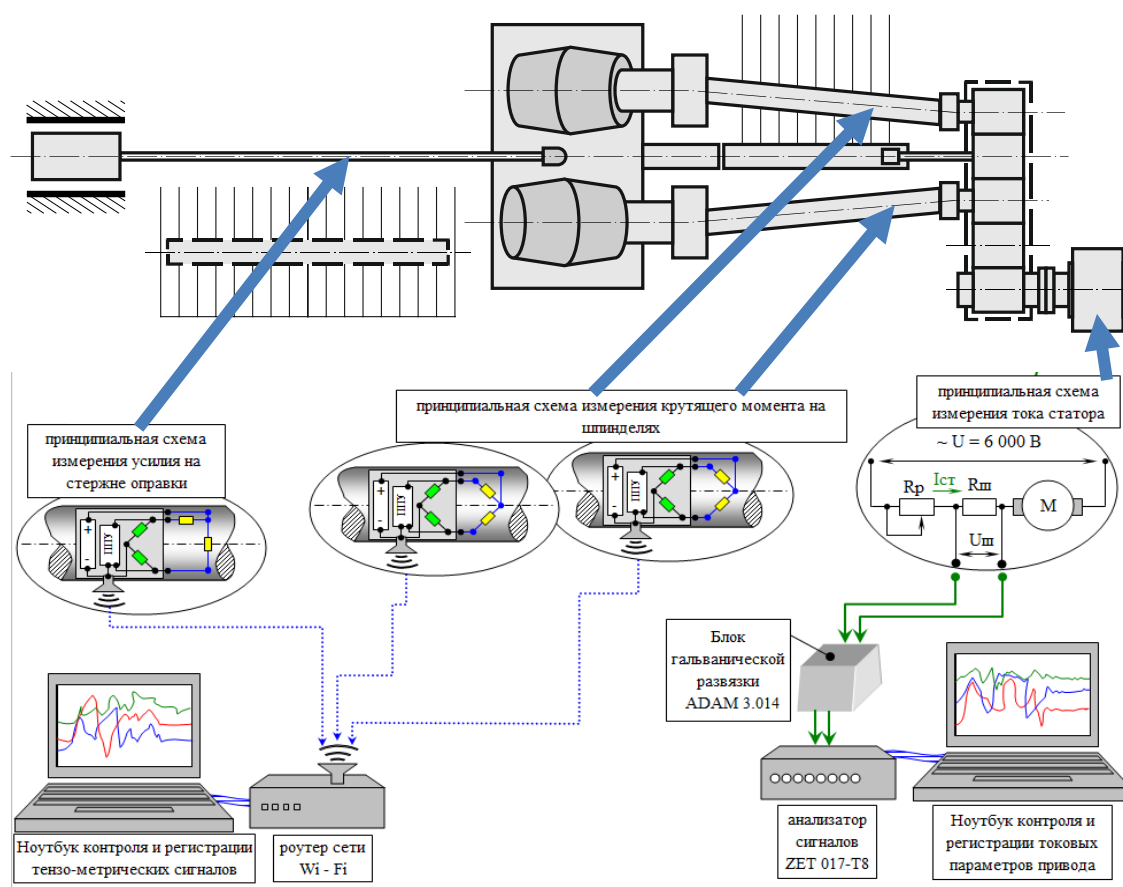


Рисунок 4 – Принципиальная схема измерений энергосиловых параметров на обкатном стане

Регистрация токов якорных цепей электродвигателей привода рабочих валков обкатного стана ($I_{я}$, $n_{я}$) производилась от контрольно-измерительных приборов, находящихся в машинном зале. Подключение сигнала к анализатору сигналов ZET 017-T8 выполнено через блок гальванической развязки ADAM 3.014. Для записи крутящих моментов на шпинделях размещались розетки тензорезисторов (полумостовая схема) из 2-х и 3-х датчиков ФК-20-100 соответственно и приёмно-передающие блоки.

Программа исследования охватывала маршруты прокатки труб диаметрами 159 мм, 168,3 мм, 177,8 мм, 219 мм, 245 мм с различными толщинами стенок от 7 до 12 мм. Марочный состав сталей, наблюдавшихся в ходе работы, включает углеродистые и легированные стали (Сталь 20, 45, 09Г2С, 13ХФА, 15ХНМ, 30ХГМА, 37Г2Ф).

Построенные по току главных электродвигателей обкатного стана графики крутящих моментов в линиях привода валков для рассматриваемых маршрутов прокатки позволяют сопоставить их уровень с допускаемыми значениями для различных элементов данных линий. Запись крутящих моментов на шпинделях привода обкатного стана, представленная на рисунке 5, подтверждает значения,

полученные путём пересчёта токовых нагрузок, а также показывает различия в величинах крутящих моментов между шпинделями до 1,2...2 раз.

Методами статистической обработки получены усреднённые значения для моментов прокатки, которые позволяют оценить реальный уровень нагрузок для технологического процесса, а также выполнить пересчёт для прокатки труб из сталей групп повышенной прочности. Прокатка трубы $\text{Ø}244,5 \times 8,9$ мм из стали группы прочности Е будет происходить в условиях роста сопротивления металла деформациям и в целом энергосиловых параметров процесса на следующих уровнях по отношению к аналогичным процессам для сплавов группы Д в 1,284 раза. При прокатке трубы диаметром 245 мм из сталей группы прочности Е уровень нагрузок возрастёт в среднем на 28,4%, относительно энергосиловых параметров, наблюдаемых для сталей группы прочности Д. Кроме того, даже незначительные отклонения от штатного протекания технологического процесса (паузы, отклонения геометрических размеров и т.п.) будут приводить к перегрузке за счёт охлаждения трубы и, следовательно, повышения сопротивления деформации (увеличение до 15%).

Как показывает теоретическая оценка, возрастание коэффициента напряженного состояния так же, как и на автоматическом стане составляет всего 3%. Возрастание нагрузки вследствие дополнительного снижения температуры, с учётом времени транспортировки гильзы и величины уменьшения толщины стенки гильзы (с 14 до 13 мм в соответствии с таблицей прокатки и черновой трубы с 9 до 8 мм) не должно превышать 10%.

Уже при существующем сортаменте, включая типоразмеры $245 \times 8,9$ и 219×9 из сплавов группы Д и стали 20 соответственно, отклонения от технологически обоснованных режимов настройки и размеров прокатного инструмента приводят к превышению фактических напряжений в зубчатых передачах над допускаемыми значениями. При прокатке труб $245 \times 7,9$ из сплавов группы Е на обкатных станах расчётные нагрузки дополнительно возрастут на 28%, что потребует замены существующих зубчатых передач первой быстроходной и двух последних ступеней на передачи повышенной твёрдости.

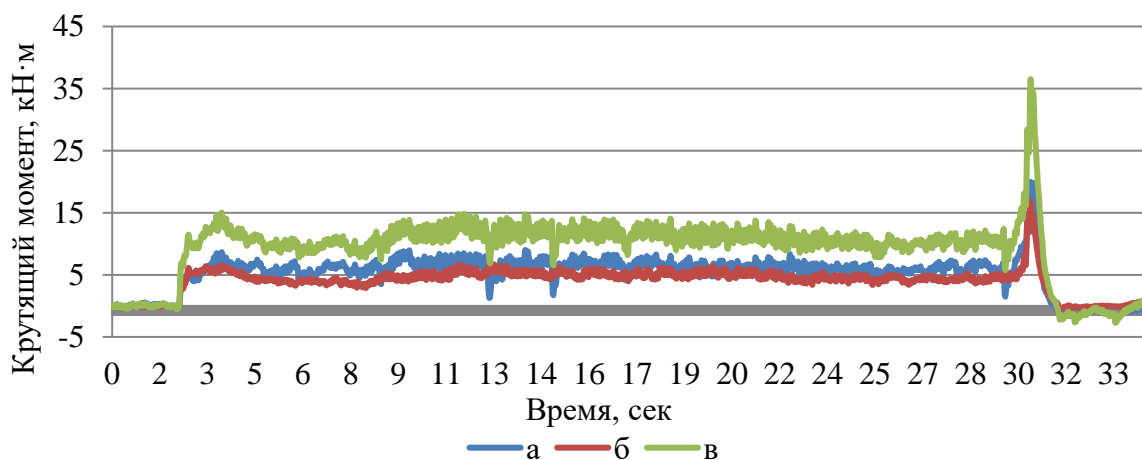


Рисунок 5 – Динамика крутящих моментов на шпинделе обкатной машины №1:
а – на 1-ом шпинделе; б – на 2-ом шпинделе; в – суммарный момент

Для удобства сравнения величин нагрузок, полученных в результате теоретических и экспериментальных исследований, выполнена обработка их значений с целью представления в виде многофакторных зависимостей. Пример графиков для случая моделирования обкатки труб из сортамента, аналогичного экспериментальному, приведён на рисунках 6 и 7.

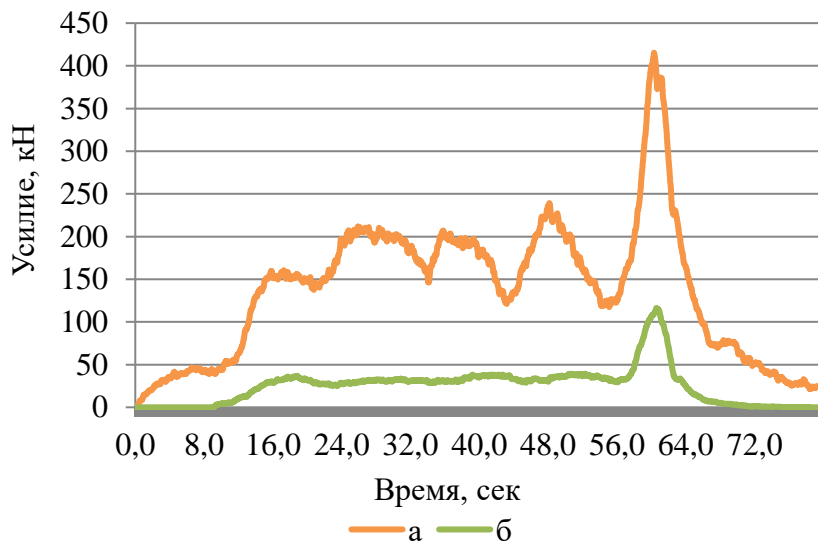


Рисунок 6 – График изменения усилия прокатки (а) и осевого усилия (б) при обкатке трубы 219×8

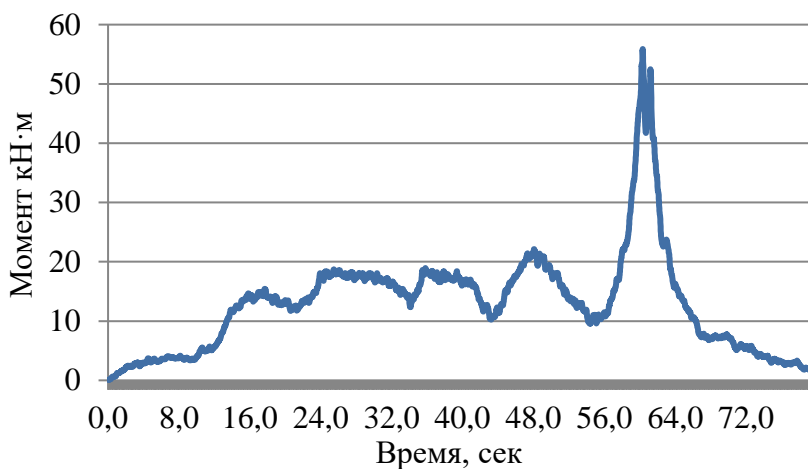


Рисунок 7 – График изменения момента на валках при обкатке трубы 219×8

Предварительный анализ выявил, что наиболее адекватным является использование линейной зависимости, в связи с чем, общий вид зависимостей имеет следующее выражение:

$$X = \frac{\sigma_s}{1000} (\alpha \cdot D + \beta \cdot \Delta D + \gamma \cdot S + \chi),$$

где X – искомый параметр процесса;

$\alpha, \beta, \gamma, \chi$ – неизвестные постоянные, которые необходимо вычислить (представлены в таблице 2);

D, S – номинальные диаметр и толщина стенки готовой трубы, мм;

ΔD – «подъём» диаметра трубы при обкатке, мм.

Таблица 2 – Значения коэффициентов линейных зависимостей

Источник данных	Название параметра	Режим обкатки	Постоянные			
			α	β	γ	χ
Эксперимент	Момент прокатки	Установившийся	-0,30	5,90	3,68	155
		Конец трубы	2,75	19,7	-13,7	-138
Теория	Момент прокатки	Установившийся	-0,21	1,54	4,505	207,7
		Конец трубы	4,14	-0,79	-5,66	-325
	Усилие на валках	Установившийся	-2,76	318,3	-34,8	975,6
		Конец трубы	33,73	160,98	-93,8	-3488,6
	Осевое усилие	Установившийся	2,9	37,9	-22,6	59,0
		Конец трубы	9,475	33,78	-115,7	657,2

С целью оценки влияния настроечных параметров процесса на нагрузки, возникающие в процессе обкатки были рассчитаны некоторые значения в следующих диапазонах параметров: $\sigma_s = 70$ МПа; $D = 159 \dots 245$ мм; $S = 8 \dots 16$ мм и $\Delta D = 4 \dots 8$. Получены зависимости по диаметру трубы для различных значений толщин стенки, а также величины подъёма диаметра. Помимо этого, выполнен анализ влияния величин для различного профиля трубы и показателя вытяжки (раздачи) в процессе обкатки.

Установлено, что в стационарной стадии обкатки, крутящие моменты и нормальные усилия имеют тенденцию к планомерному снижению для всех рассматриваемых случаев. Например, максимальные значения момента прокатки, полученные для наиболее толстой в рассматриваемом диапазоне стенки 16 мм, снижаются от 14,9 кН·м до 13,1 кН·м на 12%.

Разница между значениями моментов для повышенных значений степени деформации составляет при диаметре трубы 159 мм 11% (эксперимент) и 11% (моделирование); для диаметра трубы 245 мм 15% (эксперимент) и 16% (моделирование). Для меньшей степени деформации разница между значениями будет составлять при диаметре трубы 159 мм 12% (эксперимент) и 11% (моделирование) и для диаметра трубы 245 мм 18% (эксперимент) и 16% (моделирование).

Аналогично, максимальные величины усилия прокатки получены для толщины стенки 16 мм: от 159,6 кН для диаметра 159 мм и до 134,7 кН для диаметра 245 мм (падение на 16%) при подъёме диаметра 8 мм; и от 115,3 кН для диаметра 159 мм и до 90,4 кН для диаметра 245 мм (падение на 22%) при подъёме диаметра 4 мм.

Зависимости, выведенные для пиковых нагрузок, соответствующих попаданию задних концевых дефектов в калибр клетки, демонстрируют рост с увеличением диаметра трубы. Максимальные значения получены для толщины стенки 8 мм, для которого изменение отношения D/S от 20 до 30 приводит к возрастанию пиковых значений момента от 24,3 кН·м до 40,8 кН·м (на 68%). Рост толщины стенки от 8 мм до 16 мм вызывает падение момента прокатки на 32% в начале рассматриваемого диапазона диаметров и на 19% в его конце.

Наибольшие значения усилий на валке достигаются для более тонкостенных труб при толщине стенки 8 мм и ранжируются от 168,8 кН при

диаметре 159 мм и до 371,9 кН при диаметре 245 мм (рост в 2,2 раза) при раздаче трубы 8 мм. Снижение раздачи до 4 мм приводит к уменьшению усилий на 27% на нижней границе указанного сортамента и на 12% в верхней.

Согласно линейным зависимостям, осевые усилия демонстрируют иной характер поведения и имеют тенденцию к возрастанию при увеличении диаметра во всех рассматриваемых случаях. Например, при раздаче диаметра 4 мм и толщине стенки 16 мм возрастание осевого усилия от диаметра 159 мм до диаметра 245 мм 80%. Увеличение раздачи диаметра при обкатке ведёт к повышению осевого усилия, в частности, при изменении «подъёма» диаметра от 4 мм до 8 мм для труб толщиной стенки 8 мм рост осевых усилий составляет 21% для диаметра 245 мм, а для труб толщиной стенки 16 мм – 60% для того же диаметра.

При раскатке концевых участков наблюдается всплеск осевых усилий, наиболее явно выраженный для более тонкостенных труб. Рост усилий при толщине стенки 8 мм и раздаче диаметра 8 мм возрастает в указанном диапазоне диаметров на 54%. Максимальный рост в 33% имеет место для $D/S = 28$ и $\varepsilon = 0,04$ от 120 кН до 160 кН. Снижение параметров до $D/S = 14$ и $\varepsilon = 0,02$ приводит к снижению осевых усилий относительно максимальных значений ($D/S = 28$ и $\varepsilon = 0,04$) при диаметре 159 мм на 45% и при диаметре 245 мм на 52% (рост значений при этом в пределах 17%.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексного исследования процесса поперечно-винтовой обкатки труб в двухвалковой клетке обкатного стана трубопрокатного агрегата выполнен анализ и определены основные направления совершенствования технологии и оборудования обкатных станом линий производства горячекатаных труб, которые включают определение напряжённо-деформированного состояния металла, оценку энергосиловых параметров и конечного формоизменения труб, расчёт нагруженности силовых элементов рабочей линии стана с целью расширения сортамента производимой продукции за счёт включения материалов групп повышенной прочности и более экономичного профиля. В процессе комплексного исследования **решены следующие научные задачи:**

1. В ходе экспериментального исследования выявлен новый вид продольных концевых дефектов, образующихся после раскатки гильзы в клетке автоматического стана продольной прокатки на короткой оправке, характерный для определенного сортамента тонкостенных труб, начиная с $D/S > 25$.

2. Разработан алгоритм определения напряжённо-деформированного состояния металла в очаге деформации процесса поперечно-винтовой прокатки трубы на конической оправке на основе КЭ моделирования, который позволяет определить компоненты тензора напряжений, деформаций и скоростей с целью расчета энергосиловых параметров процесса для различных стадий формоизменения трубы для оценки влияния кривизны обработанной заготовки на рост нагрузок на прокатный инструмент.

3. Для различной геометрии продольных дефектов выполнены описания их раскати в клетки обкатного стана, которые приводят к росту усилий на валке для $D/S = 20$ в 1,7 раза от установившегося режима, для $D/S = 28$ в 1,9 раза и для $D/S = 35$ в 2,3 раза соответственно при максимальном диаметре 245 мм, выпускаемом на трубопрокатном агрегате ТПА-220. В свою очередь это приводит к всплеску значений моментов прокатки. Выявлено также влияние концевых дефектов на рост осевых усилий на оправку и на проводковый инструмент.

4. Выполнено экспериментальное исследование по измерению токовых параметров якоря электродвигателя обкатного стана, устанавливающее достаточную сходимости между результатами экспериментальных исследований и теоретического изучения очага деформации процесса на основе построения линейных зависимостей моментов прокатки, как для установившегося процесса, так и для завершающей стадии попадания концевых дефектов в калибр валков.

5. Выполнены тензометрические исследования измерения крутящих моментов на шпинделях рабочей линии обкатного стана, подтверждающие данные силовых замеров электропривода стана, а также выявившие неравномерное распределение нагружения между прокатным инструментом, в результате предоставившие возможность научно обоснованной настройки клетки автоматического стана.

6. Выполнена математическая обработка теоретических и экспериментальных данных, позволившая рассчитывать уровень нагружения рабочей линии обкатного стана для труб групп повышенной прочности в рамках установленного диапазона диаметров труб от 159 мм до 245 мм за счёт учёта физико-механических свойств марок сталей, профиля трубы и степени деформации трубы при обкатке для всех стадий процесса.

В рамках дальнейшей разработки темы, основные положения диссертации и методики расчёта рекомендуется использовать для проектирования новых и совершенствования действующих технологических режимов прокатки бесшовных труб на автоматических станах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Belyaev S.Yu. Integrated study of load distribution between the working and support rollers of sheet straightening machines with one row of support rollers / S.Yu. Belyaev, A.A. Fedulov, E.Yu. Raskatov, **M.Y. Bulganina**, A.S. Alexandrova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – V. 2456. – С. 020009. 0,350 п.л. / 0,150 п.л. (**Scopus**)
2. Belyaev S.Yu. Studying the process of pipe reeling based on the monitoring of the drive's loading parameters / S.Yu. Belyaev, A.A. Fedulov, **M.Yu. Bulganina**, V.I. Kuznetsov // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 38(4), – P. 1813-1816. 0,200 п.л. / 0,075 п.л. (**WoS, Scopus**)

3. Fedulov A.A. Exclusion of the pipe rear end defects in the process of the PRP 220 rolling using the FE modeling / A.A. Fedulov, S.Yu. Belyaev, V.A. Morgunov, **M.Yu. Bulganina**, R.K. Khasenov // AIP Conference Proceedings. – 2021. – V. 2402. – С. 070010. 0,350 п.л. / 0,100 п.л. (**Scopus**)
4. Chumakova L.A. The methodology of a part lifetime calculation / L.A. Chumakova, **M.Y. Bulganina**, A.S. Alexandrova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 862. – С. 032037. 0,200 п.л. / 0,075 п.л. (**Scopus**)
5. Chechulin Yu.B. Theoretical Research on the Pipe Rolling Process in Order to Determine the Deformation of the Pipe Billet and the Load on the Rolling Tool / Yu.B. Chechulin, A.A. Fedulov, A.I. Dronov, V.A. Morgunov, **M.Yu. Bulganina** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 718, – С. 012004. 0,250 п.л. / 0,075 п.л. (**Scopus**)
6. Belyaev S.Yu. Experimental Research of the Hot-Rolled Pipe Wall Sizing Process at the Reeling Mill of Pipe-Rolling Plant-140 in Conditions of Product Mix Extension / S.Yu. Belyaev, Yu.B. Chechulin, A.A. Fedulov, **M.Yu. Bulganina** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 718, – С. 012002. 0,300 п.л. / 0,100 п.л. (**Scopus**)
7. Belyaev S.Yu. Research of Load Distribution between Working and Backup Rolls of Sheet Levelling Machine with Regard to Gaps and Heat Strain / S.Yu. Belyaev, Yu.B. Chechulin, A.A. Fedulov, **M.Yu. Bulganina** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 718, – С. 012003. 0,300 п.л. / 0,100 п.л. (**Scopus**)

Другие публикации:

8. Belyaev S.Yu. Experimental Study of Features of Thin-Walled Pipes Sizing in the Line of a Pipe Rolling Plant with an Automatic Mill / S.Yu. Belyaev, A.A. Fedulov, Yu.M. Chernyshev, V.I. Kuznetsov, **M.Yu. Bulganina** // MATEC Web of Conferences. – 2021. – V. 346, – С. 01032. 0,400 п.л. / 0,100 п.л.
9. Шевелев М.М. Развитие технологии производства сварных труб из нержавеющей сталей для применения в нефтегазовой и атомной промышленности / М.М. Шевелев, И.О. Мочалова, А.В. Михалев, **М.Ю. Булганина** // Газовая промышленность. – 2020. – № 11. – С. 26–27. 0,100 п.л. / 0,050 п.л.
10. Шевелев М.М. Моделирование технологии индукционной сварки нержавеющей сталей для производства электросварных труб с повышенными эксплуатационными показателями / М.М. Шевелев, А.В. Михалев, И.О. Мочалова, Е.Ю. Раскатов, М.Г. Близник, **М.Ю. Булганина** // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2020. – № 11-12. – С. 20-22. 0,100 п.л. / 0,050 п.л.
11. Беляев С.Ю. Разработка методики рисков отказов узлов и деталей прокатного оборудования / С.Ю. Беляев, А.А. Федулов, Е.Ю. Раскатов, **М.Ю. Булганина** // Современные Материалы и Передовые Производственные Технологии (СМПТТ-2021). Сборник тезисов Международной научной конференции. Санкт-Петербург. – 2021. – С. 152-

154. 0,200 п.л. / 0,075 п.л.

12. Раскатов Е.Ю. Теоретические и экспериментальные исследования износа инструмента с целью улучшения геометрии бойков в радиально-ковочной машине / Е.Ю. Раскатов, С. Дарки, **М.Ю. Булганина** // Современные Материалы и Передовые Производственные Технологии (СМППТ-2021). Сборник тезисов Международной научной конференции. Санкт-Петербург. – 2021. – С. 87-88. 0,150 п.л. / 0,075 п.л.