

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



На правах рукописи

Аль-Джумаили Мохаммед Жасим Мохаммед

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ
РАСКАТКИ ГИЛЬЗ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
МЕТОДИКИ НАСТРОЙКИ ТРУБОПРОКАТНОГО СТАНА**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Челябинск 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ПРОЦЕСС РАСКАТКИ ГИЛЬЗ В НЕПРЕРЫВНОМ РАСКАТНОМ СТАНЕ.....	15
1.1. Особенности процесса непрерывной продольной раскатки гильз на оправке в многоклетевом стане	15
1.2. Технология процесса непрерывной раскатки гильз	26
1.3. Энергосиловые параметры процесса непрерывной раскатки гильз	33
1.4. Выводы и постановка задач исследования.....	36
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	38
2.1. Анализ условий равновесия очага деформации	38
2.2. Методика расчета межклетевых продольных усилий.....	41
2.3. Разработка программы для автоматизированного расчета энергосиловых параметров и оценка ее точности	48
Выводы по главе 2.....	55
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ НА ОПРАВКЕ	57
3.1. Физическое моделирование	57
3.1.1. Экспериментальное оборудование, мерительный инструмент и материалы	57
3.1.2. Методика проведения экспериментального исследования	61
3.1.3. Анализ результатов экспериментального исследования	64
3.1.4. Определение коэффициентов уравнения регрессия.....	67
3.1.4.1. Зависимость для определения угла охвата оправки.....	67
3.1.4.2. Зависимость для определения уширения раската	71
3.2. Компьютерное моделирование.....	75
3.2.1. Исходные данные для проведения компьютерного моделирования	75
3.2.2. Обработка результатов компьютерного моделирования.....	77
3.2.3. Анализ результатов компьютерного моделирования	80
3.3. Уточнение разработанной методики и математической модели для расчета энергосиловых параметров процесса прокатки	84

Выводы по главе 3.....	86
4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАСТРОЙКИ НЕПРЕРЫВНОГО РАСКАТНОГО СТАНА	87
4.1. Автоматизированная методика расчета технологических параметров процесса непрерывной раскатки гильз	87
4.2. Параметрический анализ процесса непрерывной раскатки гильз	90
4.3. Методологические основы настройки непрерывного раскатного стана.....	98
Выводы по главе 4.....	111
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	112
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	113
Приложение А.....	124
Приложение Б.....	125

Список сокращений и условных обозначений

ОАО «РосНИТИ» – Открытое Акционерное Общество «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности»;

ВНИИМЕТМАШ – Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения имени академика А. И. Целикова;

ПАО «СТЗ» – Публичное Акционерное Общество «Северский Трубный Завод»;

ПАО «СинТЗ» – Публичное Акционерное Общество «Синарский трубный завод»;

АО «ПНТЗ» – Акционерное Общество «Первоуральский новотрубный завод»;

ПАО «ТАГМЕТ» – Публичное Акционерное Общество «Таганрогский Металлургический завод»;

ОАО «БМЗ» – Открытое акционерное общество, Холдинговая компания «Белорусский металлургический завод»;

«SMS-group» – производитель и основной поставщик прокатного оборудования.

«Danieli» – разработчик и поставщик основного технологического оборудования и установок для металлообрабатывающей промышленности.

МРМ – Multistand Pipe Mill, непрерывный раскатной стан с 2-валковыми клетями и удерживаемой оправкой;

- PQF – Premium Quality Finishing, непрерывный раскатной стан с 3-валковыми клетями («SMS-group»);
- FQM – Fine Quality Mill, непрерывный раскатной стан с 3-валковыми клетями («Danieli»);
- ТПА – Трубопрокатный агрегат;
- ПШБ – Печь с шагающими балками;
- СК – Система калибров;
- ALS – система автоматической настройки частоты вращения валков раскатного стана;
- ISC – система компенсации динамической нагрузки при захвате раската;
- AFB – система адаптивной балансировка валков;
- АММС – система адаптивной компенсации упругой деформации рабочего инструмента;
- EDC – система автоматической настройки частоты вращения валков стана-извлекателя;
- АСО – Axial Change Over, конструкция непрерывного раскатного стана (PQF, FQM), имеющая станину туннельного типа;
- LCO – Lateral Change Over, конструкция непрерывного раскатного стана (PQF, FQM), имеющая возможность осуществлять замену клетей в боковом направлении;
- BCO – Bilateral Change Over, конструкция непрерывного раскатного стана (PQF, FQM), имеющая

возможность осуществлять замену клетей как с левой, так и с правой стороны;

HCCS – Hydraulic Capsule Control System,
автоматизированные гидравлические капсулы;

S_0 – Начальная толщина стенки гильзы;

S_1 – Конечная толщина стенки гильзы;

d_0 – Наружный диаметр гильзы;

d_1 – Наружный диаметр раската;

n – Число валков, образующих калибр;

d_n – Средний диаметр трубы на входе в очаг деформации;

d_k – Средний диаметр трубы на выходе из очага деформации;

s_n – Толщина стенки трубы на входе в очаг деформации;

s_k – Толщина стенки трубы на выходе из очага деформации;

σ_0 – Напряжение от заднего продольного усилия;

σ_1 – Напряжение от переднего продольного усилия;

$\sigma_{ср}$ – Усредненное по объему очага деформации сопротивление металла пластической деформации;

$F_{к1}$ – Площадь зоны опережения на контакте с рабочим валком;

$F_{к0}$ – Площадь зоны отставания на контакте с рабочим валком;

- α_0 – Угол захвата;
- γ – Нейтральный угол;
- f_{on} – Коэффициент трения на контакте с оправкой;
- f_{ϵ} – Коэффициент трения на контакте с валком;
- $F_{\text{коп}}$ – Одна треть площади контакта металла с оправкой;
- l – Длина очага деформации;
- N_{ϕ} – Мощность формоизменения;
- N_m – Мощность сил трения-скольжения;
- N_{ϵ} – Мощность, подводимая со стороны приводных валков;
- N_0 – Мощности межклетевых натяжений/подпора на входе в очаг деформации;
- N_1 – Мощности межклетевых натяжений/подпора на выходе из очага деформации;
- v_{cp} – Средняя линейная скорость валков;
- P_B – Усилие на валок;
- P_{on} – Усилие на оправку;
- FDA-offline* – Система для регистрации усилий на валки стана FQM в режиме реального времени;
- D/S – Параметр тонкостенности;
- $B\%$ – Показатель уширения раската;
- μ_i – Коэффициент вытяжки в i -ой клетки;

- k – Коэффициент напряженного состояния металла трубы;
- φ_{Σ} – Угол охвата оправки со стороны трех валков;
- $x_{c5}; y_{c5}$ – Координаты центра радиуса галтели R5;
- $x_{c2}; y_{c2}$ – Координаты центра радиуса выпуска R2;
- $x_{c1}; y_{c1}$ – Координаты центра радиуса обжимной зоны R1
- E – Эксцентриситет;
- $R5$ – Радиус галтели;
- $R2$ – Радиус выпуска;
- $R1$ – Радиус обжимной зоны;
- $\alpha4$ – Угол сопряжения;
- $\alpha5$ – Угол выпуска;
- W – Межвалковый зазор;
- B – Половина ширины ручья калибра валка;
- L – Ширина валка;
- D_k – Диаметр ручья калибра;
- ϕFg – Диаметр валка по дну калибра;
- ϕN – Номинальный диаметр валка.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из наиболее перспективных и передовых подходов, получившим наибольшее распространение при производстве бесшовных труб, является применение трубопрокатных агрегатов с непрерывным раскатным станом. Это обусловлено, в первую очередь, постоянно растущими требованиями, предъявляемыми к точности геометрических параметров, качеству выпускаемой продукции и производительности оборудования.

В непрерывном раскатном стане получают черновые трубы как правило нескольких диаметров с различной толщиной стенки. Для расширения сортаментного ряда труб в линии ТПА предусмотрены калибровочные, либо редуционно-растяжные станы.

В современном непрерывном раскатном стане деформация гильз распределяется, как правило, между 5-6 клетями с трехвалковыми калибрами. Это дополнительно накладывает определенные ограничения, а ход течения процесса снижает возможность варьирования технологическими параметрами процесса прокатки в широком диапазоне. Кроме этого, прокатка осуществляется на удерживаемой оправке, что приводит к изменению кинематики процесса прокатки, а это, в свою очередь оказывает влияние на все остальные параметры процесса деформирования. Наличие отмеченных особенностей предопределяет необходимость уточнения теоретического описания процесса непрерывной продольной прокатки труб, а также разработку и адаптацию математических моделей для расчета, прогнозирования и выбора рациональных режимов деформаций для всего сортаментного ряда труб, производимого в непрерывном раскатном стане.

Следует отметить, что непрерывные раскатные станы нового поколения появлялись в России сравнительно недавно. Тем не менее поставщиками основного оборудования и технологии прокатки остаются по настоящее время только два конкурирующих концерна: немецкий «SMS-group» и итальянский

«Danieli». С одной стороны, это затрудняет процесс совершенствования технологии т.к. самостоятельное внесение изменений в технологический процесс не представляется возможным ввиду ограниченности доступа к математическим моделям поставщиков оборудования. С другой стороны, это определяет необходимость в создании собственных уникальных математических моделей расчета и методик настройки, позволяющих осуществлять предварительный анализ технологий, в частности при освоении новых видов трубной продукции с уникальными характеристиками, а также выполнять корректировку технологии в процессе производства труб.

Значительный теоретический и практический вклад в исследование и развитие процессов продольной прокатки труб внесли как отечественные, так и зарубежные авторы: Я.Л. Ваткин, В.М. Друян, Г.И. Гуляев, 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 и др. Большинство известных в настоящее время исследований проведено для станов с двухвалковыми клетями, имеющих определенные отличия в сравнении с трехвалковыми. Это, в свою очередь, не позволяет перенять в полном объеме накопленный опыт исследования процессов деформации в непрерывных раскатных станах с трехвалковыми клетями.

Для обеспечения устойчивой работы данных агрегатов, а именно, отсутствия поломки технологического инструмента, разрывов или смятия трубы, необходимо заранее знать усилия, действующие на технологический инструмент, и продольные усилия, возникающие в деформируемой заготовке. В настоящее время отсутствуют аналитические, не требующие сложных вычислений, универсальные, научно-обоснованные методики расчета усилий, действующих на технологический инструмент непрерывных раскатных станов, и методики расчета скоростных режимов, учитывающие состояние заготовки между клетями непрерывного стана.

Таким образом, повышение эффективности процесса непрерывной раскатки гильз на основе совершенствования методики моделирования трубопрокатного агрегата является в настоящее время *актуальной задачей*.

Целью работы является повышение эффективности процесса непрерывной раскатки гильз за счет совершенствования методики настройки скоростного режима трубопрокатного агрегата.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Разработать инженерную методику расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной прокатки.
2. На основе этой методики разработать аналитическую математическую модель процесса непрерывной продольной прокатки труб с использованием длиной удерживаемой оправки.
3. Построить эмпирические модели для определения геометрических границ очага деформации при продольной прокатке труб в одной клетки.
4. Оценить точность полученной математической модели.
5. С использованием полученной математической модели выполнить параметрический анализ и определить основные закономерности процесса непрерывной раскатки гильз на стане с удерживаемой оправкой.
6. Разработать технические предложения по повышению устойчивости процесса непрерывной раскатки гильз на удерживаемой оправке.

Научная новизна работы. В ходе теоретического и экспериментального исследования процесса продольной прокатки труб на оправке:

- разработаны уникальные эмпирические модели для расчета угла охвата оправки и уширения раската, уточняющие методики расчета площади контактной поверхности;

- определено влияние скорости перемещения оправки на технологические и энергосиловые параметры процесса прокатки. Разработана математическая модель для расчета усилия удержания оправки;

- на основе энергостатического метода и эмпирических зависимостей разработана методика расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз в многоклетевом раскатном стане, позволяющая в режиме реального времени с высокой степенью точности определять усилие прокатки в чистовых клетях, с погрешностью менее 1% определять усилие прокатки в черновых клетях стана, рассчитывать величину продольных усилий между клетями.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработанные математические модели, алгоритм и методика расчета технологических параметров процесса прокатки, способствующие определению рациональных режимов деформации как для действующей технологии прокатки, так и при освоение новых видов трубной продукции.

Результаты диссертационной работы:

- реализованы и внедрены в учебный процесс в виде методических материалов, применяемых при подготовке практических занятий и самостоятельной работы бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» и магистров 22.04.02 «Металлургия» по направлению подготовки «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» (Приложение А).

- реализованы в виде рекомендаций и автоматизированной методики расчета технологических и энергосиловых параметров процесса прокатки для использования при разработке и освоении новых видов трубной продукции с повышенными деформационными характеристиками, а также для предварительного анализа технологии и корректировки настройки стана FQM в процессе производства (Приложение Б).

Апробация работы. Основные результаты исследования опубликованы в ряде научно-технических изданий и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе международных: 8-я научная конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральского Государственного Университета, г. Челябинск, 2016.; XXII Международная научно-практическая конференция «Трубы-2018», г. Челябинск. ; The first International Conference on Materials Engineering and Science, (IConMEAS) held in Istanbul Aydin University--Turkey, 2018; 77-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», г. Магнитогорск, 2019 г.; The second International Conference on Materials Engineering and Science, University of Technology Baghdad-Iraq, 2019.

Работа выполнена на кафедре «Процессы и машины обработки металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»).

Положения, выносимые на защиту: результаты исследования технологии раскатки гильз на непрерывном раскатном стане с трехвалковыми клетями; исследование параметров формоизменения при различном соотношений D/S раскатываемых труб; математические зависимости, описывающие угол охвата оправки и уширение раската; алгоритм и методика расчета межклетевых продольных усилий в режиме реального времени; анализ условий работы оправки непрерывного стана на технологические и энергосиловые параметры процесса прокатки; параметрический анализ и определение основных закономерностей процесса непрерывной раскатки гильз на стане с удерживаемой оправкой; опытно-промышленное исследование и сопоставление результатов, полученных с использованием разработанной методики расчета технологических параметров процесса прокатки с промышленными данными; методологические основы настройки непрерывного раскатного стана, способствующие повышению качества

трубной продукции, а также снижению риска возникновения аварийных ситуаций.

Исследования процесса продольной прокатки труб на оправке проводились на лабораторном прокатном стане в условиях ОАО «РосНИТИ». Сопоставление результатов расчета по разработанной методике осуществлялось в условиях ПАО «СТЗ» в линии ТПА со станом FQM.

1. ПРОЦЕСС РАСКАТКИ ГИЛЬЗ В НЕПРЕРЫВНОМ РАСКАТНОМ СТАНЕ

Важнейшим условием обеспечения высокой эффективности производства и удовлетворения современных требований к качеству бесшовных горячедеформированных труб является правильный выбор технологической схемы и типа оборудования линии трубопрокатного агрегата. Классическая схема изготовления бесшовных горячедеформированных труб предусматривает четыре основных этапа технологии: формирование поллой трубной заготовки-гильзы, раскатку гильзы, редуцирование и отделку готовой трубы. Поэтому все известные ТПА имеют в своем составе оборудование для прошивки заготовки в гильзу, раскатной стан для уменьшения толщины стенки гильзы (традиционно это станы автоматической, пилигримовой, винтовой и непрерывной прокатки, речные станы) и непрерывный редуцирующий (калибровочный) стан для формирования заданного размера трубы [1].

1.1. Особенности процесса непрерывной продольной раскатки гильз на оправке в многоклетевом стане

Интенсивное развитие производства бесшовных труб на ТПА с непрерывным раскатным станом в отечественной и зарубежной практике получило развитие в 70-80 гг. прошлого столетия. Прогрессивность данного способа, в сравнении с пилигримовыми [3] и автоматическими станами [4], обуславливается как высокой производительностью, так и экономическими показателями [5-15].

В сравнении с другими способами, раскатка толстостенных гильз в черновые трубы на непрерывных длинооправочных станах обеспечивает наилучшие показатели качества по геометрии и чистоте поверхности [16]. Так, например, прокатку в автоматическом стане ведут в два прохода (редко в три). Перед каждой прокаткой внутрь гильзы забрасывают (вручную) поваренную

соль, расплав которой является технологической смазкой. После каждого прохода оправку снимают со стержня, а рабочие валки разводят для пропуска трубы на переднюю сторону стана. Трубы в валки задаются пневматическим толкателем. После первого прохода трубу кантуют примерно на 90° и, если для этой операции используют кантующие ролики, то этими же роликами пользуются для задачи трубы в валки. Возвращение трубы после очередного прохода на переднюю сторону стана осуществляется роликами обратной подачи. В свою очередь это способствует появлению дефектов на наружной поверхности [17-21].

При производстве бесшовных труб в линии ТПА с непрерывным раскатным станом полуо заготовку (гильзу) раскатывают в передельную трубу с требуемой толщиной стенки. С целью расширения производимого сортаментного ряда труб окончательное формирование толщины стенки и наружного диаметра осуществляется на редуционно-растяжных и калибровочных станах. При этом формирование толщины стенки передельной трубы, при прокатке на непрерывном раскатном стане, в значительной мере определяет характер распределения продольной и поперечной разнотолщинности стенки и состояние поверхности на готовых трубах. Это в итоге определяет качество производимого продукта [22].

Станы с удерживаемой оправкой могут иметь клетки как с 2-валковыми, так и с 3-валковыми калибрами (клетями). В работе [23-30] показано, что клетки с 3-валковыми калибрами позволяют получать более высокую точность труб по толщине стенки благодаря более равномерному распределению обжатий в поперечном сечении очага деформации по клетям непрерывного раскатного стана [24]. Этому, в частности, способствует лучшее центрирование оправки за счет приложения нагрузки в трех направлениях [27]. Более равномерное обжатие в поперечном сечении очага деформации по клетям непрерывного раскатного стана снижает поперечную разнотолщинность стенки и способствует получению еще более точных труб.

Большинство работающих в настоящее время станов с 3-валковыми клетями имеют в своем составе пять-шесть клетей, что уменьшает длину стана и, соответственно, еще больше уменьшает длину используемых оправок [29]. Уменьшение длины стана также способствует уменьшению длины некондиционных концевых участков труб и, следовательно, сокращению обрезки [31]. Кроме этого, уменьшение длины оправки позволяет увеличить ее диаметр и за счет этого увеличить размеры прокатываемых труб. Следует отметить, что оправка непрерывного раскатного стана состоит из трех частей: концевая часть, удлинитель, рабочая часть. При этом, подогрев рабочей части оправок перед прокаткой осуществляется в печи с выдвижным подом и внешней рециркуляционной камерой до температуры 150 °С (обеспечивается лучшее расплавление графитовой смазки) [32-34]. В процессе раскатки оправка перемещается с постоянной скоростью. В конце процесса раскатки оправка удерживается до тех пор, пока трубная заготовка не будет снята станом извлекателем [33].

Наряду с вышеизложенным дополнительно можно отметить следующее: одной из основных проблем, связанной с использованием плавающей оправки, является то, что извлечение оправки из трубы после прокатки на непрерывном раскатном стане осуществляется на отдельно стоящем устройстве, при перемещении к которому передельная труба остывает, ее линейные размеры уменьшаются, плотность окова оправки увеличивается и при её извлечении появляются царапины и риски на внутренней поверхности трубы [35-39]. В составе современных непрерывных раскатных станов с удерживаемой оправкой для снятия трубы с оправки в непосредственной близости от непрерывного раскатного стана в линии прокатки расположен извлекательно-калибровочный стан [40]. Благодаря этому труба перед снятием с оправки практически не теряет свою температуру, зазор между внутренней поверхностью трубы и оправкой остается, что исключает появление рисок и царапин при снятии трубы с оправки и обеспечивает высокое качество внутренней поверхности трубы.

Использование удерживаемой оправки также имеет следующие преимущества перед плавающей оправкой:

- меньшая длина рабочей части оправки;
- компактное размещение оборудования для циркуляции оправок.

В работе [41] также отмечаются преимущества станов с 3-валковыми калибрами, к которым относятся минимальная разница окружных скоростей вала по периметру калибра и меньшее количество типоразмеров оправок в виду возможности большей величины радиальной регулировки валков. Минимальная разница окружных скоростей должна дать эффект с точки зрения уменьшения износа валков и улучшения качества поверхности трубы. Минимальное количество типоразмеров оправок способствует снижению издержек на содержание инструмента.

Современные трубопрокатные станы в значительной степени автоматизированы [42-45], и как следствие на них установлено значительное количество датчиков, показания которых позволяют собрать большое количество данных о работе стана без вмешательства в его работу и тем более без внесения в его конструкцию каких-либо изменений [43]. Это справедливо для всех действующих станом, не только недавно введённых в эксплуатацию, но и для более старых прошедших модернизацию агрегатов. Для повышения качества раскатываемых труб, стабильности протекания процесса раскатки, а также повышения выхода годного стан FQM имеет различные системы автоматического управления, в частности, систему автоматической настройки частоты вращения валков раскатного стана – ALS; систему компенсации динамической нагрузки при захвате раската – ISC; систему адаптивной балансировки валков – AFB; систему адаптивной компенсации упругой деформации рабочего инструмента – AMMC; систему автоматической настройки частоты вращения валков стана-извлекателя – EDC и другие.

Ряд современных непрерывных станом оборудован системой гидроутопления концов труб. Перед прокаткой переднего конца трубы специальными гидроцилиндрами, установленными под нажимными винтами,

рабочие валки двух последних обжимных клетей сводят, уменьшая размеры калибра. В процессе прокатки заднего конца черновой трубы гидроцилиндры осуществляют быстрый свод рабочих валков по определенной программе. При этом на концах трубы формируются участки переменной толщиной стенки и диаметром. Впоследствии при редуцировании черновой трубы возникает утолщение стенки на концах трубы [47-48]. В результате обоих процессов примерно в 2 раза сокращается длина, так называемых, утолщенных концов труб прокатанных на ТПА с непрерывным станом. В 1975 г. этот способ впервые в практике трубного производства был успешно опробован ВНИИМЕТМАШ на ТПА 30-102 АО «ПНТЗ». Этот способ был внедрен на ТПА в г. Риза (ГДР). С 1985 г. данная технология используется на непрерывном стане фирмы «Сумитомо металл индастриз» в Кайнанае (Япония). Недостатками гидроутонения является рост межклетевого подпора, который наряду с уменьшением раствора между валками, вызывает локальное изменение диаметра и рост поперечной разностенности на концах трубы. На указанном выше стане одновременно со сводом рабочих валков осуществляют регулирование их частоты вращения, изменяя межклетевое натяжение для компенсации отклонений толщины стенки и диаметра трубы. При непрерывной прокатке на длинной подвижной оправке возможны отклонения технологического процесса, вызывающие образование «гармошек» [46] или разрывов трубы под действием чрезмерного межклетевого подпора или натяжения. Эти явления увеличивают потери металла и могут привести к выходу из строя рабочих валков. Для предотвращения подобных явлений на непрерывном стане ТПА-80 СинТЗ была внедрена система мониторинга нагрузок на привод рабочих валков, которая отключает стан при появлении первых признаков аварийных режимов раскатки [49-50].

Тем не менее, непрерывные станы с 3-валковыми клетями по сравнению со станами с 2-валковыми клетями имеют ряд недостатков. В частности, из материалов статьи [28] следует, что основным недостатком 3-валковых клетей является то, что для обеспечения одинаковой с 2-валковыми клетями

нагрузочной способности опор рабочих валков конструктивно необходимо увеличивать диаметр валков. Обычно непрерывные станы имеют 5-8 клетей с соответствующими индивидуальными электроприводами [29]. Коэффициент вытяжки при раскатке составляет от 2,5 до 5,0. Это, в свою очередь, приводит к увеличению момента прокатки и, следовательно, к увеличению требуемой мощности двигателя и габаритов клетки в целом.

Конструктивной особенностью непрерывных раскатных станов нового поколения является стана использование:

- станины туннельного типа – конструкция-АСО [23, 25, 27];
- конструкция станины с боковой выдачи клетей – LCO [44, 51];
- конструкция станины с двухсторонней выдачей клетей – ВСО [52].

Также, применение трехвалковой схемы вместо традиционной двухвалковой позволяет уменьшить неравномерность окружной скорости валков, а также параметров напряженно-деформированного состояния по периметру калибра [53-55]. Результатом этого является уменьшение уширения металла, снижение пиковых значений давления металла на валки и лучшее центрирование оправки в калибре; возможность прокатки труб из высоколегированных марок стали, а также более тонкостенных труб; снижение концевой обрезки (вследствие уменьшения величины «раздутых» концов черновой трубы); меньший расход инструмента; более высокая маневренность стана, позволяющая прокатывать широкий сортамент труб; более равномерный температурный режим раскатки; малая длина стана, обеспечивающая уменьшение рабочей длины оправки [54].

Основные элементы трехвалкового калибра современного трубопрокатного стана приведены на рисунке 1.

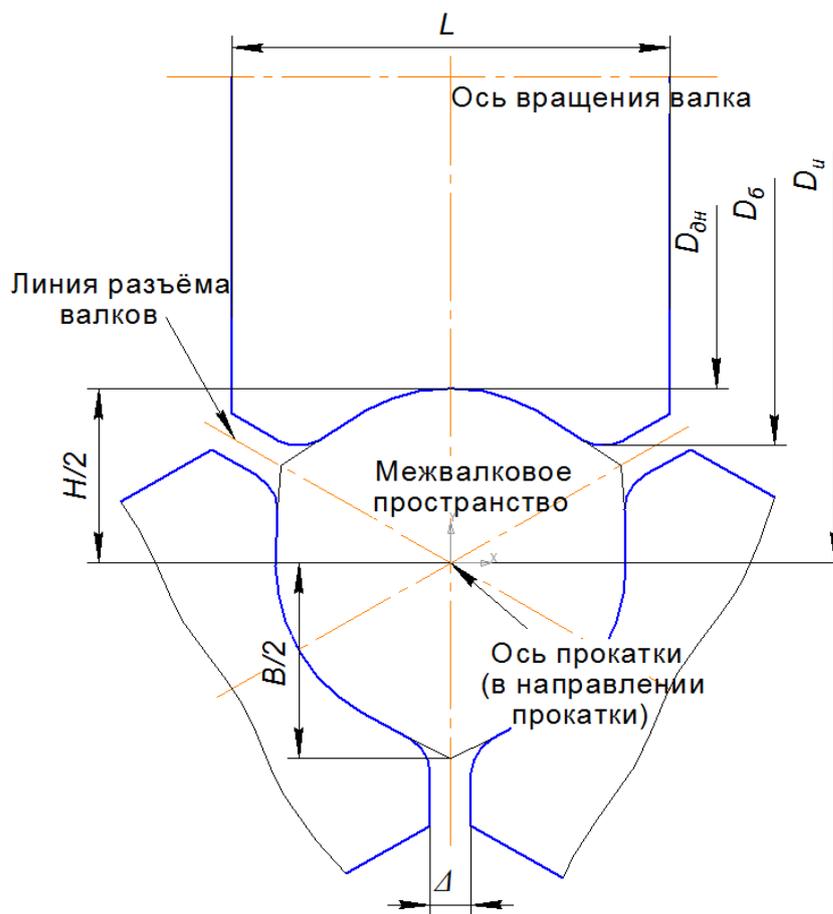


Рисунок 1 – Геометрические параметры калибра и бочки вала непрерывного трехвалкового стана

На рисунке 1 символами обозначено:

$D_{\text{б}}$ - диаметр бочки вала, мм;

$D_{\text{и}}$ - идеальный диаметр вала (расстояние от оси вращения вала до оси прокатки), мм;

$D_{\text{дн}}$ - диаметр вала по дну калибра, мм;

L - ширина бочки вала, мм;

H - высота калибра, мм;

B - ширина калибра (условная величина – пересечение радиуса выпуска с линией разъёма валков), мм;

Δ - зазор между валками, мм.

Диаметр бочки валка должен быть строго регламентирован для каждой клетки. При диаметре бочки валка, согласно нормативной документации, ниже допустимого ухудшается захват раската валками. В случае установки комплекта валков с разными диаметрами бочки в одну клетку происходит нарушение режима прокатки [56].

При непрерывной прокатке на оправке рассматривают три основные зоны деформации в поперечном сечении очага деформации:

- 1) зона обжатия стенки по вершине калибра или зона интенсивного обжатия;
- 2) переходная зона, в которой происходит уменьшение интенсивности обжатия стенки на оправке, длина зоны зависит от формы выпусков калибра (по прямой, либо по радиусу), диаметр оправки, режимов обжатий;
- 3) зона редуцирования (внеконтактная зона), в которой металл не соприкасается с оправкой.

Дефекты на трубах могут зарождаться как при продольной прокатке, так и при прошивке. При продольной прокатке дефекты после прошивного стана получают своё дальнейшее развитие. Основные дефекты наружной поверхности труб при продольной прокатке: скворечник, трещины различного вида, подрез, царапины на наружной поверхности, закат, отпечатки, шов прокатки [46, 48, 55].

Основными причинами возникновения дефектов различного типа при продольной прокатке являются:

- межклетевые натяжения;
- неравномерность деформации по периметру калибра;
- неблагоприятное напряжённо-деформированное состояние раската;
- износ рабочего инструмента;
- плёны и трещины на наружной поверхности гильзы.

Другие факторы, оказывающие влияние на возможность появления дефектов:

- недостаточный нагрев или перегрев заготовки;
- неравномерное охлаждение гильзы перед прокаткой;
- неправильно выставленная ось прокатки;
- налипание металла на валки непрерывного стана;
- выступающие части оборудования на ТПА по пути следования раската.

Поскольку при раскатке гильзы на станах продольной прокатки имеет место неравномерность обжатия по диаметру и толщине стенки трубы в пределах ширины калибра, это приводит к неравномерной деформации и возникновению напряжений различных знаков.

На основании анализа влияния коэффициента вытяжки и окружных скоростей по поверхности калибра на напряжённость профиля В.В. Швейкин [57] приходит к выводу, что характер продольных напряжений в поперечном сечении трубы разный для первого и второго проходов. В. П. Анисифоров приходит к выводу, что по вершине калибра возникают напряжения сжатия, направленные вдоль трубы, а в выпусках – напряжения растяжения. При этом он не уточняет, относится ли это только к первому или последующим проходам. Для проверки вышеизложенных соображений А.П. Чекмарёвым и В.Л. Ваткиным [58-60] проведены специальные опыты, которые показали, что при втором проходе часть сечения трубы в выпусках калибров не испытывает непосредственного обжатия валками и подвергается внеконтактной деформации. Поэтому в местах развала калибра в трубе возникают большие растягивающие напряжения, которые могут превзойти предел прочности металла и вызвать поперечные разрывы тела трубы – дефект типа «скворечник». Данный вид брака часто встречается при производстве труб на с автоматическом стане, особенно при производстве труб тонкостенного сортамента. Таким образом, очаг деформации при прокатке труб в калибрах представляет собой поле с неравномерным напряженным состоянием. На большей части этого очага деформации наблюдается схема всестороннего неравномерного сжатия.

Подробное рассмотрение характера распределений деформаций в калибре автоматического стана приведено для лучшего понимания процессов, происходящих в последовательности калибров, которая используется в непрерывных станах, где при прокатке тонкостенных труб также наблюдается дефект типа «скворечник». Причём его возникновение наблюдалось при прокатке труб, как в двухвалковых, так и трёхвалковых калибрах непрерывного стана.

На основе проведённого анализа можно выделить основные причины возникновения дефекта типа «скворечник» в непрерывном стане [58, 61]:

- межклетьевые натяжения;
- неравномерность деформации по периметру калибра;
- неблагоприятное, с точки зрения качества проката, напряжённо-деформированное состояние раската в клетях непрерывного стана, как по вершине, так и по выпускам калибра.

Оправка непрерывного стана также оказывает влияние на напряжённое состояние металла при прокатке [7, 54, 70]. Дополнительная неравномерность напряжённого состояния возникает из-за того, что в зоне вершины калибра труба имеет плотный контакт с оправкой, а в зоне выпусков такой контакт отсутствует.

Оправки на станах продольной прокатки перемещаются медленнее черновой трубы [71, 72]. Поэтому препятствуют продольному течению металла на поверхности контакта. Вблизи контактной поверхности трубы и оправки возникают дополнительные растягивающие напряжения [61]. В межклетевых промежутках к наружной поверхности раската не приложено внешних воздействий, и ничто не препятствует продольному течению металла. Внутренняя поверхность раската в зоне вершины калибра предыдущей клетки, контактирует с оправкой, которая препятствует продольному течению металла, что приводит к появлению дополнительных растягивающих напряжений, в свою очередь дополнительные растягивающие напряжения приводят сначала

к дополнительной пластической деформации, а затем к разрушению материала трубы [62].

Прокатка труб на длинной оправке в круглых и овальных калибрах отличается значительной неравномерностью деформации металла, что необходимо учитывать при разработке оптимальных калибровок валков [63]. Величина окружной скорости по поверхности калибра непостоянна, и как следствие, по периметру раската наблюдаются зоны отставания и опережения [66]. При этом зона вершины калибра имеет минимальную окружную скорость и максимальное смещение металла в продольном направлении [60, 64].

Анализ литературных источников и промышленных данных показал, что основными видами износа оправок непрерывных раскатных станов является образование сетки разгарных трещин, налипание металла, износ поверхности в виде «комет», вмятины на рабочей поверхности и уменьшение диаметра рабочей части оправки (далее по тексту может быть указана, как «оправка») [22, 65]. В процессе прокатки на оправку действуют сжимающие и растягивающие напряжения, что приводит к образованию вышеупомянутых дефектов и последующей отбраковке оправок. В результате циклического температурного воздействия, характеризующегося многократным нагревом и охлаждением оправок, образуются разгарные трещины [69]. В процессе работы, по мере увеличения количества прокатанных труб, развитие трещин продолжается, они окисляются вследствие взаимодействия с агрессивной средой смазки и проникают вглубь металла, что в конечном итоге может привести к образованию глубоких трещин, выкрашиванию частиц металла и, как следствие, выходу оправки из строя [22].

Необходимо отметить, что в случае применения оправки большей длины, например для производства однократного проката вместо трёхкратного, в результате её неравномерного износа неизбежно приходится перетачивать оправки по всей длине на меньший по диаметру размер. Соответственно неизношенная часть оправки также подвергается переточке, что увеличивает затраты и время на её обработку. Также необходимо отметить,

что в случае применения оправки больше необходимой длины можно столкнуться с такими недостатками, как увеличение кривизны из-за высоких остаточных напряжений и неравномерного разогрева поверхности, что также увеличивает величину снимаемого объема металла при переточке, особенно это характерно, если ось прокатки отклонена от проектной [67].

Стоит обратить внимание, что минусами нерационального подбора длины оправки также являются возрастающие нагрузки на двигатели привода рейки, увеличение напряжений в месте сочленения рабочей части и удлинителя, как в процессе прокатки, так и в процессе транспортировки, что увеличивает вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Таким образом, наиболее логичным путём снижения дефектов на трубах, повышение эксплуатационного ресурса прокатного инструмента является перераспределение деформаций и повышение точности проката.

1.2. Технология процесса непрерывной раскатки гильз

Исходной заготовкой для раскатки является гильза, полученная на прошивном стане [1, 3, 68]. Перед задачей гильзы в непрерывный стан с удерживаемой оправкой на внутреннюю поверхность гильзы наносится дезоксидантный порошок. Перед задачей в непрерывный стан гильза поступает на высоконапорную установку гидросбива окалины, состоящую из кольцевого коллектора и группы форсунок. Кольцевой коллектор располагается таким образом, чтобы струи воды были направлены в сторону заднего конца гильзы. После установки гидросбива окалины гильза передается в следующий кольцевой коллектор, в котором сжатым воздухом удаляются остатки воды и окалины. Далее проводится раскатка гильзы на непрерывном стане. Непрерывный стан представляет собой 5-7-клетевой стан продольной прокатки с регулируемыми 2-3-валковыми клетями, с применением технологии прокатки на удерживаемой оправке [73]. Стан предназначен для раскатки гильз в трубную заготовку. Ввод гильзы в непрерывный стан осуществляется трайб-аппаратом. В процессе раскатки оправка перемещается

с постоянной скоростью. В конце процесса раскатки оправка удерживается до тех пор, пока трубная заготовка не будет снята станом извлекателем. Стан извлекатель представляет собой 3-х клетевой стан с нерегулируемыми клетями трёхвалкового типа. На выходе из стана извлекателя трубная заготовка в зависимости от толщины стенки по рольгангам передаётся в промежуточную нагревательную печь с шагающими балками, где температура трубной заготовки равномерно доводится до температуры калибровки.

После ПШБ в технологической линии прокатка осуществляется в калибровочном или редукционно-растяжном стане, предназначенными для получения трубной плети с готовыми геометрическими размерами. После охлаждения на холодильнике трубная плеть поступает на косовапковую трубоправильную машину. Правильная машина предназначена для правки продольной кривизны трубной плети по всей длине.

Технология производства бесшовных горячекатаных труб на ТПА с непрерывным станом предусматривает использование современных технологических смазок и дезоксидантов, непосредственно влияющих на качество прокатываемых труб, стойкость прокатного инструмента энергосиловые параметры процесса прокатки, производительность, а также оборудования для их нанесения.

Использование смазочных материалов на непрерывном стане производится в две стадии [74, 75]:

- обработка внутренней поверхности гильзы дезоксидантом (1-ая стадия);
- нанесение технологической смазки на рабочую поверхность оправки (2-ая стадия), при этом в период запуска в работу предусмотрена предварительная обработка рабочей поверхности оправки специальным смазочным продуктом.

Обработка внутренней поверхности гильзы и нанесение смазки на оправку производится в линии ТПА с помощью специального оборудования фирмы. Оправка как правило состоит из трех частей: концевая часть,

удлинитель, рабочая часть. Подогрев рабочей части оправок перед прокаткой осуществляется в печи с выдвижным подом и внешней рециркуляционной камерой до температуры 150 °С. Для снижения трения между трубной заготовкой и оправкой во время процесса прокатки, защиты механизмов непрерывного стана от перегрузок, на оправку, перед подачей её в стан, наносится смазка. Нанесение смазки производится на перемещаемую с постоянной скоростью оправку.

Оправочный узел непрерывных раскатных станов состоит из трёх частей: цилиндрической оправки с направляющим конусным участком на переднем торце, которая посредством ниппельного соединения задним торцом соединена с удлинителем, а последний таким же образом соединён с замковым хвостовиком с кольцевой проточкой для удержания оправочного узла в захвате во время прокатки. Следует отметить, что основными причинами концентрации зоны износа оправок непрерывного стана на её переднем конце являются [61]:

- повышенные обжатия в первых клетях непрерывного стана;
- неравномерное распределение температуры гильзы по её длине (охлаждённый передний конец);
- неравномерное распределение плотности смазочного покрытия по длине оправки;
- изменение температуры разогрева поверхности оправки по её длине после прокатки в непрерывном стане;
- неравномерный нагрев оправок перед прокаткой;
- стягивание трубной заготовки с оправки станом извлекателем.

В настоящее время известно, что основными видами разностенности при прокатке бесшовных труб являются эксцентричная, образующаяся в процессе прошивки на станах косой прокатки и располагающаяся по длине гильз по некоторой винтовой линии, а также симметричная (гранённость раската), обусловленная неравномерностью деформации при прокатке труб в круглых, овальных, шестигранных и других видах калибров [76-79].

На черновых и готовых трубах наблюдаются оба вида разностенности. При прокатке труб в линии ТПА с непрерывным раскатным станом эксцентричная разностенность наводится только в случае отклонений отдельных клетей от оси прокатки стана. Симметричная разностенность, кроме основной причины, вызванной неравномерностью деформации в калибре, может быть обусловлена и другими факторами, например, переполнением калибров металлом, износом калибров, перекосом валков, смещением ручьёв калибра относительно друг друга, унификацией оправок. В работе [76] проведён сравнительный анализ различных видов обжимных калибров оправочных станов продольной прокатки с целью определения их влияния на формирование разностенности в поперечном сечении очага деформации на выходе из i -ой клетки и выбора оптимальной формы калибра для обжимных клетей непрерывного оправочного стана с длинной оправкой. Установлено, что в большинстве случаев деформация металла в черновых калибрах при заданных режимах прокатки сопровождается затеканием металла в межвалковый зазор.

Из практики трубного производства известно, что в качестве обжимных клетей наибольшее распространение получили калибры: шестигранные (многогранные), круглые и овальные с прямыми и радиусными выпусками [1, 77-79]. При проектировании новых калибровок валков непрерывных станом с целью снижения различного рода дефектов, возникающих в процессе продольной прокатки, уменьшения разностенности раската в i -ой клетки стана и как следствие на готовых трубах, а также уменьшения переполнения калибров в сравнении с аналогами, необходимо учитывать следующие факторы:

- геометрию калибра;
- заполнение 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 разработанного калибра, должен быть сопоставим с коэффициентом вытяжки заменяемого калибра.

Равномерность распределения толщины стенки раската в поперечном сечении очага деформации во многом зависит от заполнения выпусков калибра *i*-ой клетки оправочного стана продольной прокатки. На этот параметр влияют следующие факторы:

- овальности калибров;
- отношение l_o / D_{cp} (l_o - длина очага деформации по вершине калибра в направлении прокатки, D_{cp} - средний диаметр трубы);
- распределение обжатий по профилю поперечного сечения калибра;
- соотношение поперечного профиля раската, входящего в *i*-ую клеть непрерывного стана, с профилем калибра с учётом свода-развода валков;
- величина утолщения и утонения стенки в выпусках калибра.

Разностенность раската начинает формироваться в первых клетях непрерывного стана в связи с высокой неравномерностью деформаций, обусловленной большими обжатиями толщины стенки раската по вершинам калибров первой и второй клеток (таблица 1).

Таблица 1 – Основные функции по клетям непрерывного стана

Группа	№ Клетей	Функция
Черновая группа	Первая	Максимальное обжатие толщины стенки гильзы с учётом обеспечения устойчивого захвата
	Вторая	Максимальное обжатие участков толщины стенки раската по вершинам калибра, соответствующих зонам выпусков калибра первой клетки

Предчистовая группа	Третья	Выравнивание толщины стенки раската
Чистовая группа	Четвёртая	Окончательное формирование участков толщины стенки раската, соответствующих зонам выпусков калибра третьей клетки
	Пятая	Окончательное формирование участков толщины стенки раската, соответствующих зонам выпусков калибра четвёртой клетки

Исследования, проведённые в работе [80], показывают, что чем больше величина абсолютной разностенности толщин стенок по периметру профиля раската в калибрах непрерывного стана, в которых происходит основная деформация металла, тем выше поперечная разностенность при выходе из чистовых клеток. Наибольшее обжатие стенки при использовании шестигранных, круглых и овальных калибров происходит в вершине калибра, наименьшее - в выпусках. Неравномерность обжатий также подтверждается экспериментальными и расчётными данными определения давлений металла на валки в различных сечениях очага деформации [49, 56]. Применение многогранной формы калибра, на основании промышленных и экспериментальных данных [81], ведёт к снижению энергосиловых параметров и повышению точности толщины стенки раската, в сравнении с круглыми и овальными калибрами. Стоит отметить, что применение шестигранных калибров в непрерывном стане не является оптимальным решением, с точки зрения качества раската, так как такая форма калибра может способствовать возникновению различного рода дефектов при прокатке тонкостенного сортамента. Калибр с числом граней больше шести, который, по сути, является кругом, 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 замеры износа инструмента автоматического стана [24] 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.

На равномерность формоизменения толщины стенки раската также значительное влияние оказывает отношение угла в обжимной зоне калибра (вершина) к углу в зоне редуцирования (выпуск). Углы выпусков выбирают так, чтобы течение металла в поперечном направлении было относительно свободным, с целью уменьшения «окова» оправки, также они должны обеспечивать равномерность деформации металла и улучшение геометрических размеров трубы, особенно в последних клетях стана [25].

Снижение неравномерности деформации также возможно не только путём изменения калибровки валков, но и за счёт применения оправки многогранной формы. Для трубопрокатного агрегата с автоматстаном, в составе которого имеется раскатной стан, оптимальное число граней оправки – шесть [46, 54]. Как известно, оправка автомат стана достаточно точно позиционируется относительно вертикальной и горизонтальной осей калибра, а перед прокаткой во втором проходе трубу обязательно кантуют на 90°. Применение длинной многогранной оправки на непрерывном стане является трудновыполнимой задачей. Изготовление такой оправки потребует существенных затрат, возникнет сложность в её точном позиционировании, а при прокатке грани будут располагаться как по выпускам калибра i -ой клетки, так и по вершине калибра $(i+1)$ – ой клетки, что приведёт к повышению гранёности раската и возникновению различного рода дефектов трубопрокатного производства. Наиболее перспективным направлением уменьшения неравномерности деформации на непрерывных станах при

помощи оправок является унификация их диаметров. Обоснованный подход к определению типоразмеров оправок показал свою целесообразность на непрерывном стане 30-102 ЮТЗ [50].

1.3. Энергосиловые параметры процесса непрерывной раскатки гильз

В процессе прокатки на непрерывном раскатном стане валки и оправка эксплуатируются при сложных температурных условиях и постоянных циклических знакопеременных нагрузках, в результате чего подвергаются значительному износу. В свою очередь, проведение прокатки при усилиях достигающих критических значений приводит к возникновению аварийных ситуаций, вызванных, в частности, разрушением материала рабочего инструмента (валки, оправка). Причем отмеченные обстоятельства наиболее выражены в первых клетях стана, где металл трубы подвергается большим обжатиям [82]. Ввиду того, что деформация при прокатке труб в непрерывном стане распределяется в 5-6 клетях, это дополнительно накладывает определенные ограничения и снижает возможность варьирования технологическими параметрами процесса прокатки в более широком диапазоне [63]. В связи с этим возникает необходимость в разработке и адаптации математических моделей для расчета, прогнозирования и выбора рациональных режимов обжатий для всего сортаментного ряда труб, производимого в непрерывном раскатном стане.

Износ валков стана пропорционален величине среднего удельного давления, действующего на поверхность калибра [83]. Площадь контакта деформируемого металла с инструментом зависит от многих факторов: начальной и конечной геометрии металла, формы и размеров инструмента, механических свойств металла и др. При любых условиях всегда имеются две зоны деформации: контактная и внеконтактная [84]. В случае, когда прочность обрабатываемого металла сравнительно низка, внеконтактная зона невелика и ее размерами по отношению к контактной зоне можно пренебречь. При более

высокой прочности обрабатываемого металла внеконтактная зона деформации возрастает и это в свою очередь оказывает существенное влияние на величину контактной зоны деформации.

При прокатке труб в круглых калибрах каждое волокно металла вдоль оси прокатки меняет знак кривизны при переходе из внеконтактной зоны деформации в зону контакта с поверхностью вала. Можно считать, что первая точка контакта любого волокна металла с поверхностью вала (поверхностью вращения) не имеет кривизны. Совокупность таких точек на поверхности деформируемой трубной заготовки образует некоторую линию, которая совместно с выходным сечением ограничивает контактную поверхность металла с валком.

Отмеченные особенности, в первую очередь, приводят к изменению кинематики процесса прокатки, что, в свою очередь оказывает влияние на все остальные параметры технологического процесса. Соответственно возникает необходимость уточнения теоретического описания процесса непрерывной продольной прокатки труб с учетом отмеченных изменений. Для анализа процесса непрерывной продольной прокатки труб, прежде всего, необходимо наличие математических моделей для определения энергосиловых параметров процесса и их связи со скоростным режимом прокатного стана [85]. В настоящее время известен ряд методик расчета силовых параметров процесса раскатки гильз в непрерывных раскатных станах [3, 68, 86, 87].

Основным недостатком этих методик является то, что они не учитывают влияние на энергосиловые параметры продольных усилий, возникающих в межклетевых промежутках. Учесть этот недостаток позволяет методика, основанная на рассмотрении условий равновесия проекций сил, действующих на очаг деформации в радиальном и продольном направлении, и условия баланса мощностей [87-89]. При этом условия равновесия проекций сил на продольную ось позволяет определить величину среднего давления на контакте с рабочими валками, а условия равновесия сил в радиальном направлении позволяют определить величину среднего давления на оправку.

Условия баланса мощностей, в свою очередь позволяют определить величину межклетевых продольных усилий [87].

В работах [3, 12] приводятся зависимости для определения нормальных напряжений при прокатке трубы в одной клетки на свободно плавающей длиной оправке. Зависимости получены на основе теоретического анализа условий равновесия сил, действующих на элементарный слой, выделенный в очаге деформации. При этом рассматриваются случаи, когда оправка перемещается со скоростью большей, чем скорость перемещения труб, и когда оправка перемещается со скоростью меньшей, чем скорость перемещения трубы. Также в работе [12] приводится формула для расчета осевого усилия, возникающего на поверхности контакта трубы и оправки в i -ой клетки. Несколько иной метод определения усилия, действующего на валки, представлен в работе [90]. Формула для расчета величины среднего давления металла на валки выводится из рассмотрения условий равновесия проекций сил, приложенных ко всему очагу деформации в отдельной клетки раскатного стана, что исключает необходимость вычисления сложных интегралов и дает в конечном итоге более точные результаты расчетов. Поскольку при этом рассматривается два условия равновесия проекций действующих сил – на продольную ось, совпадающую с осью прокатки, и на перпендикулярную ей ось – также появляется возможность аналитического определения усилия, действующую на оправку [91].

Однако, точность расчета технологических параметров при этом во многом зависит от корректного определения площадей контакта деформируемого металла с технологическим инструментом. Для определения контактных поверхностей, в свою очередь, необходимо рассчитывать уширение металла и величину охвата металлом оправки [92]. Аналитический вывод этих зависимостей в принципе возможен, но его трудоемкость будет существенно выше, чем получаемый уточняющий эффект. Поэтому для определения зависимостей для расчета уширения и угла охвата оправки

металлом более предпочтительным является получение эмпирических зависимостей.

Следует отметить, что для корректного расчета необходимо знать величину напряжений от продольных усилий и границу между зонами опережения и отставания. В случае непрерывной прокатки труб эта информация заранее не известна и зависит от скоростного и деформационного режимов стана. Методика аналитического решения такой задачи, представленная в работе предполагает рассмотрение уравнения баланса мощностей, записанное для всего непрерывного стана, определение с его помощью величины секундного объема и затем последовательного определения технологических параметров процесса прокатки в каждой из клеток. В то же время исследования, выполненные в работе [93], показали, что решение уравнения баланса мощностей для всего непрерывного стана является трудоемкой задачей даже при использовании современной компьютерной техники. В связи с этим целесообразно разработать упрощенную методику определения величины секундного объема (константы непрерывной прокатки). В основу которой положен тот факт, что при раскатке гильз в непрерывном стане последняя клетка, как правило, является проглаживающей, коэффициент вытяжки в ней небольшой и, соответственно, изменение скорости трубы также не значительно. На основании этого можно принять, что скорость трубы на выходе из последней клетки стана равняется средней линейной скорости вращения валков последней клетки.

1.4. Выводы и постановка задач исследования

В ходе анализа научно-технической литературы и производственных данных было установлено следующее:

1. Наиболее современными являются трубопрокатные агрегаты с непрерывным раскатным станом с удерживаемой оправкой и 3-валковыми клетями.

2. Для обеспечения устойчивой работы таких агрегатов, а именно, отсутствия поломки технологического инструмента, разрывов или смятия трубы, необходимо заранее знать усилия, действующие на технологический инструмент, и продольные усилия, возникающие в деформируемой заготовке.
3. В настоящее время отсутствуют аналитические, не требующие сложных вычислений, универсальные, научно-обоснованные методики расчета усилий, действующих на технологический инструмент непрерывных раскатных станов, и методики расчета скоростных режимов, учитывающие состояние заготовки между клетями непрерывного стана.

Для достижения цели работы, которой является повышение эффективности процесса непрерывной раскатки гильз за счет сокращения аварийных ситуаций, необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Разработать инженерную методику расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной прокатки.
2. На основе этой методики разработать аналитическую математическую модель процесса непрерывной продольной прокатки труб с использованием длиной удерживаемой оправки.
3. Построить эмпирические модели для определения геометрических границ очага деформации при продольной прокатке труб в одной клетке.
4. Оценить точность полученной математической модели.
5. С использованием полученной математической модели выполнить параметрический анализ и определить основные закономерности процесса непрерывной раскатки гильз на стане с удерживаемой оправкой.
6. Разработать технические предложения по повышению устойчивости процесса непрерывной раскатки гильз на удерживаемой оправке.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

2.1. Анализ условий равновесия очага деформации

Усилия, действующие на валки и оправку определим с помощью энергостатического метода [87]. Расчетная схема, на основе которой делается вывод, приведена на рисунке 2.

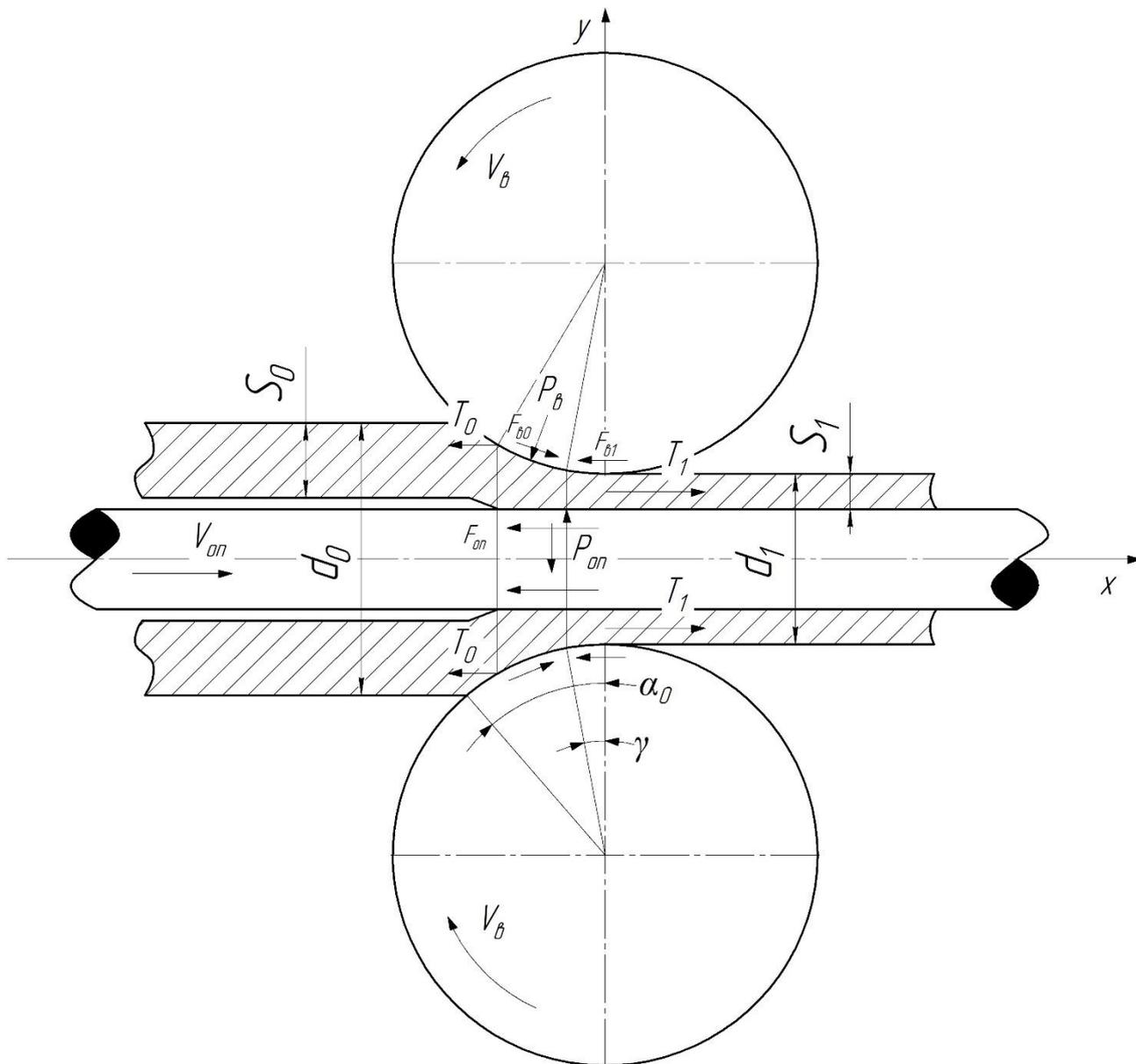


Рисунок 2 – Схема действия сил в продольном направлении очага деформации

Согласно рисунку 2 основные уравнения равновесия сил можно записать в виде:

$$\begin{cases} \Sigma X = T_0 - nF_{b0} \cos \frac{\alpha_0}{2} + nF_{b1} \cos \frac{\alpha_0}{2} + nP_r \sin \frac{\alpha_0}{2} - T_1 + F_m = 0 \\ \Sigma Y = -F_{b0} \sin \frac{\alpha_0}{2} - P_r \cos \frac{\alpha_0}{2} + F_{b1} \sin \frac{\alpha_0}{2} + P_m = 0 \end{cases} \quad (36)$$

где F_{b0}, F_{b1} – сила трения на контакте валка и трубы в зоне отставания и опережения соответственно;

P_r – усилие на трубу, действующее со стороны валка;

S_k, S_{k0}, S_{k1} – соответственно площадь контактной поверхности трубы и валка, площадь соприкосновения трубы и валка в зоне отставания и опережения;

T_0, T_1 – усилие заднего и переднего натяжения соответственно;

p_r, p_m – нормальное давление, действующее со стороны валков и оправки соответственно.

Исходя из представленных уравнений равновесия проекций сил, получим зависимости для определения давления, действующего на валок и давления, действующего на оправку.

Из условия равновесия проекций сил на продольную ось имеем:

$$p_{cp} = \frac{\pi}{nF_k \sin \frac{\sigma_0}{2}} [S_k \sigma_1 (d_x - s_k) - s_H \sigma_0 (d_H - s_H)] - f\sigma_{ср} \frac{F_{k1} - F_{k0}}{F_k} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0}{2}, \quad (1)$$

Давление, действующее на оправку в пределах очага деформации определяется из условия равновесия проекций сил на радиальное направление

$$p_{on} = p_{cp} \frac{F_k}{F_{kon}} \cos \frac{\alpha_0}{2} - f\sigma_{ср} \frac{F_k - F_{k0}}{F_k} \sin \frac{\alpha_0}{2}. \quad (2)$$

где n – число валков, образующих калибр;

F_k – площадь контактной поверхности трубы с валком;
 d_n – средний диаметр трубы на входе в очаг деформации;
 d_k – средний диаметр трубы на выходе из очага деформации;
 s_n – толщина стенки трубы на входе в очаг деформации;
 s_k – толщина стенки трубы на выходе из очага деформации;
 σ_0 – напряжение от заднего продольного усилия;
 σ_1 – напряжение от переднего продольного усилия;
 $\sigma_{ср}$ – усредненное по объему очага деформации сопротивление металла пластической деформации;
 $F_{к1}$ – площадь зоны опережения;
 $F_{к0}$ – площадь зоны отставания;
 α_0 – угол захвата;
 f_{on} – коэффициент трения на контакте с правкой;
 $F_{коп}$ – одна треть площади контакта металла с оправкой.

Для определения угла захвата воспользуемся формулой [13]:

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{d_n - d_k}{R_e}}, \quad (3)$$

где R_e – радиус валка по вершине калибра

В виду сложности точного аналитического определения площади контактной поверхности для ее расчета воспользуемся приближенной методикой, приведенной в работе [12]:

$$F_k = l \frac{d_n + d_k}{R_e}, \quad (4)$$

Длина очага деформации l определяется по формуле [12]:

$$l = \sqrt{(d_n + d_k) \cdot R_e}. \quad (5)$$

В формулу (1) входят величины продольного напряжения σ_0 от действия заднего продольного усилия и напряжения σ_1 от действия переднего

продольного усилия. Необходимо отметить, что разработанные к настоящему времени методики определения этих величин либо противоречат физической сущности процесса непрерывной прокатки, либо основаны на численной итеративной процедуре, сходимость которой не доказана.

В основу разрабатываемой методики определения натяжений положен энергетический метод.

2.2. Методика расчета межклетевых продольных усилий

В процессе продольной прокатки труб на оправке в очаге деформации затрачиваются следующие виды мощности: мощность формоизменения N_ϕ и мощность сил трения-скольжения N_T . Подводятся в очаг деформации мощность со стороны приводных валков N_B и мощности внешних сил, в качестве которых выступают мощности межклетевых натяжений/подпора N_0 на входе в очаг деформации и N_1 на выходе из очага деформации. Таким образом, уравнение баланса мощностей для отдельно взятой клетки имеет вид:

$$N_B \pm N_1 \pm N_0 - N_\phi - N_{TB} - N_{T0} = 0$$

где N_{TB} – мощность трения скольжения на контакте с валками;

N_{T0} – мощность сил трения скольжения на контакте с оправкой.

Уравнение баланса мощностей для одной отдельно взятой клетки содержит три неизвестных: продольные напряжения на границах очага деформации и координату критического сечения (угла) на контактной поверхности с валками в вершине калибра. Анализ показывает, что уравнение баланса мощностей может быть решено если будет известна величина секундного объема, которая является константой процесса непрерывной прокатки. В принципе секунднй объем может быть определен из уравнения баланса мощностей, записанного для всего непрерывного стана. Это

уравнение является суммой уравнений балансов мощностей для отдельно взятых клеток. Однако при этом, как показано в работе [93], в результате получается сложное нелинейное уравнение, решение которого, во-первых, требует больших временных и вычислительных ресурсов, и, во-вторых, решение все равно будет приближенным. В связи с этим для определения величины секундного объема была предложена следующая гипотеза: практически всегда коэффициент вытяжки в последней клетке непрерывного раскатного стана не превышает значений 1,02-1,03, поэтому принимается, что скорость металла на выходе из последней клетки стана равняется средней линейной скорости валков, последнее связано с тем, что линейная скорость по ширине бочки валка различна из-за вреза ручья калибра. В свою очередь, средняя линейная скорость валков определяется следующим образом:

$$v_{\text{ек}}^{\text{cp}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ек}}}{2} (d_{\text{Б}} + d_{\text{В}}), \quad (6)$$

где $n_{\text{ек}}$ – частота вращения валков k -й клетки стана;

$d_{\text{Б}}$ и $d_{\text{В}}$ – диаметр бочки валка и диаметр по дну калибра.

Величина секундного объема в этом случае будет равна:

$$V_{\text{ек}} = v_{\text{ек}}^{\text{cp}} \frac{\pi \cdot n_{\text{ек}}}{2} (D_{\text{Б}} + D_{\text{В}}) \cdot S_k.$$

Из формул (1), (2) видно, что для вычисления значений средних контактных давлений необходимо прежде всего знать значения продольных напряжений, возникающих в межклетевых промежутках и величину нейтрального угла, определяющего границу между зонами отставания и опережения. Величина нейтрального угла может быть легко определена при заданных величинах частоты вращения валков и полученной формуле для расчета величины секундного объема. Для вычисления величин σ_0 , σ_1 может быть применен энергетический метод, базирующийся на уравнении баланса мощностей. Однако, получается, что уравнение баланса мощностей для

отдельно взятой клетки одно и содержит две неизвестных. С другой стороны, это касается произвольно взятой клетки непрерывного стана. Если же рассмотреть первую клетку, то для нее характерно то, что продольное усилие, приложенное к задней границе очага деформации равно нулю. Следовательно, уравнение баланса мощности, записанное для первой клетки непрерывного стана, позволяет определить напряжение σ_1 , приложенное к передней границе очага деформации. В свою очередь, напряжение действующее на переднюю границу очага деформации первой клетки является напряжением, действующим на заднюю границу второй клетки. Следовательно, решая уравнение баланса мощностей для второй клетки непрерывного стана, можно определить напряжение, действующее на передней границе непрерывного стана. Аналогичным образом можно определить продольные напряжения, возникающие во всех промежутках между клетками.

Определим составляющие баланса мощностей для случая продольной раскатки гильзы. При анализе кинематики раскатки гильзы в стане продольной прокатки использовалось поле скоростей, приведенное в работе [16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_z = v_1 \left[1 - \frac{z}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(1 - \frac{z}{l} \right) \right], \\ v_\rho = v_1 \left[1 - \frac{z}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 - \frac{z}{l} \right) \right] \frac{\rho}{r} \frac{z}{R_s}. \end{array} \right. \quad (7)$$

где v_1 – продольная скорость трубы на выходе из очага деформации;
 μ – коэффициент вытяжки.

Для этого поля скоростей интенсивность касательных напряжений после некоторых упрощений может быть записана в виде:

$$H = 2v_1 \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{1}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 \frac{z}{l} - 1 \right) + \frac{z}{(d_n + d_k) R_s} \left(1 - \frac{z}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 \frac{z}{l} - 1 \right) \right) \right]. \quad (8)$$

Соответственно, мощность формоизменения будет равна:

$$N_{\phi} = 1,15 \pi \sqrt{\frac{2}{3}} v_1 \sigma_{sc} \left(\frac{d_n + d_k}{2} - \delta_0 \right) \left[\frac{l^2}{(d_n + d_k) R_B} + \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(1 - l - \frac{5l^2}{6(d_n + d_k) R_B} \right) \right]. \quad (9)$$

Для определения площадей зон отставания и опережения, входящих в уравнение (1), необходимо знать уравнение границы между этими зонами. Это уравнение можно получить, приравняв горизонтальную проекцию вектора окружной скорости вала к горизонтальной проекции вектора скорости металла. В результате получим уравнение:

$$y_{\gamma} = \sqrt{R_k^2 - \left[R_B + R_K - \frac{v_1}{2\pi n_B} \left(1 - \frac{z_y}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 - \frac{z_y}{l} \right) \right) \right]^2}. \quad (10)$$

Однако, в связи с тем, что площадь контактной поверхности принята в виде прямоугольника, границу между зонами опережения и отставания также целесообразно принять в виде прямой линии перпендикулярной направлению прокатки. В этом случае $z_y = z_{yc} = const$.

Тогда z_{yc} определяется как среднее арифметическое между значениями по вершине калибра и на продольной границе очага деформации (рисунок 3).

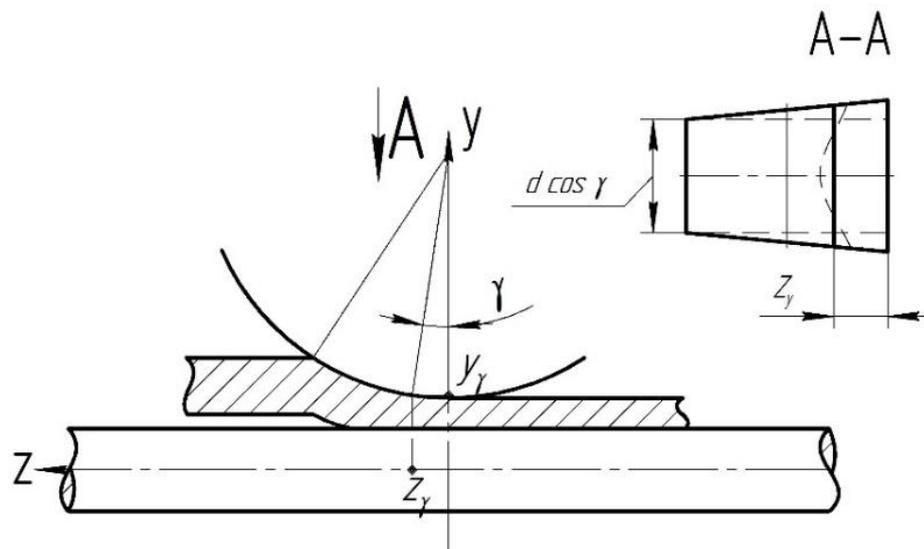


Рисунок 3 – К определению координаты z_y

В соответствии с формулой (9) z_y в вершине калибра будет равна:

$$z_{y_6} = l \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\mu}{\mu - 1} \right) \left(1 - \frac{2\pi n_6 R_6}{v_1} \right)} \right]. \quad (11)$$

Координата z_y на продольной границе очага деформации будет равна:

$$z_{y_6} = l \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\mu}{\mu - 1} \left[1 - \frac{2\pi n_6}{v_1} \left(R_6 + R_k - \sqrt{R_k^2 - \frac{(r_n + r_k)^2}{4}} \right) \right]} \right]. \quad (12)$$

Зная границу между зонами опережения и отставания, можно определить мощность активных сил трения [87], подводимую валками в очаг деформации:

$$N_\tau = f \sigma_{sc} v_1 \frac{r_n + r_k}{2} \left[2 y_{zc} \left(1 - \frac{\mu - 1}{\mu} \frac{z_{yc}}{l} 1 + \frac{z_{yc}}{3l} \right) - l \frac{2 + \mu}{3\mu} \right]. \quad (13)$$

В процессе раскатки затрачивается мощность сил трения-скольжения на контакте внутренней поверхности трубы с оправкой. Используя подходы, описанные в работе [13], она может быть определена по формуле:

$$N_{тон} = 2\pi f_0 \sigma_{sc} l \left(v_1 \frac{2 + \mu}{3\mu} - v_{on} \right). \quad (14)$$

где v_{on} – скорость перемещения оправки.

Следует отметить, что формула (14) получена для условий полного охвата оправки металлом труб. В реальных условиях металл охватывает оправку не по всему периметру, поэтому в формуле (14) целесообразно ввести множитель $k = \psi/\pi$, где ψ – угол охвата оправки металлом [3].

Наряду с отмеченными выше видами мощности, к очагу деформации при раскатке гильз могут подводиться мощности, создаваемые продольными усилиями в межклетевых промежутках.

Согласно известным формулам мощности заднего N_0 и переднего N_1 продольных усилий равны:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_0 = \pi \sigma_0 s_H v_1 \left(\frac{2r_H - s_H}{\mu} \right), \\ N_1 = \pi \sigma_1 s_K v_1 (2r_H - s_K). \end{array} \right. \quad (15)$$

$$N_1 = \pi \sigma_1 s_K v_1 (2r_H - s_K). \quad (16)$$

Подставляя формулы (8), (12), (13), (14) и (15) в уравнение баланса мощностей, получим выражение для определения напряжения σ_1 :

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & \frac{2f_0 \sigma_{sc} l \mu}{s_H (2r_H - s_H)} \left(\frac{2 + \mu}{3\mu} - \frac{v_{on}}{v_1} \right) - \frac{f \sigma_{sc} \mu (r_H + r_K)}{2\pi s_H (2r_H - s_H)} \left[2z_{yc} \left\langle 1 - \frac{\mu - 1}{\mu} \frac{z_{yc}}{l} \left(1 + \frac{z_{yc}}{2l} \right) \right\rangle - l \frac{2 + \mu}{3\mu} \right] \\ & + 1.15 \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sigma_{sc} \mu (r_H + r_K - \delta_0)}{s_H (2r_H - s_H)} \left[\frac{l^2}{2(r_H + r_K)R_B} + \frac{\mu - 1}{\mu} (1 - l) - \frac{5l^2}{12(r_H + r_K)R_B} \right] - \sigma_0 \end{aligned} \quad (17)$$

Наличие аналитической зависимости среднего контактного давления от определяющих параметров процесса продольной прокатки труб на оправке позволяет анализировать влияние возмущающих и управляемых параметров на амплитуду возможных колебаний среднего контактного давления. В частности, в соответствии с работой [7], при этом могут быть определены передаточные функции непрерывного прокатного стана, как механической системы. Если не учитывать взаимное влияние определяющих параметров, то передаточные функции для основных возмущающих параметров могут быть записаны в виде:

$$k_s = \frac{\partial p_{cp}}{\partial s_H} = - \frac{\pi \sigma_0 (d_H - 2s_H)}{nF_k \sin \alpha_0}$$

$$k_d = \frac{\partial p_{cp}}{\partial d_H} = - \frac{\pi \sigma_0 s_H}{nF_k \sin \alpha_0}$$

$$k_{\sigma_0} = \frac{\partial p_{cp}}{\partial \sigma_0} = - \frac{\pi s_H (d_H - s_K)}{nF_k \sin \sigma_0}$$

$$k_{\sigma_1} = \frac{\partial p_{cp}}{\partial \sigma_1} = - \frac{\pi s_k (d_k - d_k)}{n F_k \sin \alpha_0}$$

$$k_f = \frac{\partial p_{cp}}{\partial f} = - \sigma_{scp} \frac{F_{K1} - F_{K0}}{F_K} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0}{2}$$

$$k_\sigma = \frac{\partial p_{cp}}{\partial \sigma_{scp}} = f \frac{F_{K1} - F_{K0}}{F_K} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0}{2}$$

Поэтому для решения поставленной задачи предлагается следующий алгоритм:

1. На основе принятой гипотезы о том, что скорость выхода трубы из непрерывного стана равняется средней линейной скорости валков последней клетки, определяется величина секундного объема:

$$V_{ck} = v_{ck}^{cp} \frac{\pi \cdot n_{ek}}{2} (D_B + D_B) \cdot S_k, \quad (18)$$

где S_k – площадь поперечного сечения трубы на выходе из непрерывного стана;

2. Полученная величина секундного объема подставляется в уравнение баланса мощностей 1-й клетки стана и, с учетом того, что для неё заднее натяжение равно нулю, определяется переднее натяжение.

3. Переднее натяжение для первой клетки является задним натяжением для второй клетей стана. Соответственно, зная заднее натяжение для второй клетки и величину секундного объема, из уравнения баланса мощностей определяется переднее натяжение для 2-й клетки.

4. Процесс вычислений аналогично продолжается вплоть до последней k -й клетки стана.

5. После этого по формулам (1), (2) определяется давление на валки и оправку в каждой из клетей непрерывного раскатного стана.

Момент на валках определяется по известным зависимостям [3]:

$$M = PR_e \sin \frac{\alpha_0}{2} \pm (T_0 - T_1)R_y, \quad (19)$$

где P – усилие, действующее на валок;

T_0 – заднее продольное усилие;

T_1 – переднее продольное усилие;

R_y – радиус валка, соответствующий координате z_{yc} (катающий радиус).

2.3. Разработка программы для автоматизированного расчета энергосиловых параметров и оценка ее точности

Реализация разработанной методики осуществлена с использованием стандартного приложения Microsoft Excel. В таблице 2 приведены принятые в методике обозначения.

Таблица 2 – Принятые обозначения

Параметр	Размерность	Обозначение
R_B	мм	радиус валка по вершине калибра;
R_6	мм	радиус валка по буртам;
r_n	мм	средний радиус трубы на входе в очаг деформации;
r_k	мм	средний радиус трубы на выходе из очага деформации;
δ_0	мм	диаметр оправки;
s_n	мм	начальная толщина стенки трубы;
s_k	мм	конечная толщина стенки трубы;
n	шт.	число валков, образующих калибр;
n_B	об/с	частота вращения валков в клетях стана;
μ	-	коэффициент вытяжки;
v_1	мм/с	продольная скорость трубы на выходе из очага деформации;

t	°С	температура;
f	-	коэффициенты трения на поверхности контакта металла с валком;
f ₀	-	коэффициенты трения на поверхности контакта металла с оправкой;
v _{оп}	мм/с	скорость перемещения оправки;
t	мм	толщина слоя смазки, наносимой на оправку;
k	-	коэффициент неплотного прилегания к оправке;
ζ	-	коэффициент адаптации;
R _к	мм	катающий радиус;
l	мм	длина очага деформации;
b _{ср}	мм	средняя ширина очага деформации;
F _к	мм ²	площадь контактной поверхности (уточненная);
α ₀	рад	угол охвата;
z _{γв}	мм	координата z _у по вершине калибра;
z _{γб}	мм	координата z _у на продольной границе очага деформации;
z _{γс}	мм	граница между зонами отставания и опережения;
T ₀	Н	заднее продольное усилие;
T ₁	Н	переднее продольное усилие;
σ ₀	Н/мм ²	напряжение от заднего продольного усилия;
σ ₁	Н/мм ²	напряжение от переднего продольного усилия;
σ _{ср}	Н/мм ²	усредненное по объему очага деформации сопротивление металла пластической деформации;
Δb	мм	уширение;
α		угол охвата оправки;
F _{к1}	мм ²	площадь зоны опережения;

$F_{к0}$	мм ²	площадь зоны отставания;
$F_{коп}$	мм ²	площадь контакта металла с оправкой;
$\Delta v_{оп}$	-	скорость скольжения на контакте металла с оправкой;
$p_{ср}$	Н/мм ²	среднее контактное давление;
$P_{в}$	Н	усилие металла на валки;
$P_{оп}$	Н	усилие металла на оправку $P_{оп}$ в i -той клетки;
Q	Н	осевое усилие Q ;
M	Н/м	момент на валках;
σ	-	натяжение

Для оценки достоверности полученной методики расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз выполнены тестовые расчеты. Исходные данные, принятые при расчёте, соответствовали технологии прокатки труб наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 8,0 мм. Результаты расчета сравнивались с данными, полученными в процессе прокатки на стане FQM (таблица 3).

Таблица 3 – Исходные данные принятые для расчета

Клеть Параметр	№1	№2	№3	№4	№5
$R_{в}$	301,14	308,74	311,26	212,75	212,75
$R_{б}$	363,35	376,05	379,87	286,70	286,70
$r_{н}$	216,50	209,50	196,86	194,37	191,34
$r_{к}$	209,5	196,86	194,37	191,34	190,75
δ_{0}	365,20	365,20	365,20	365,20	365,20
$s_{н}$	26,9	26,9	14,26	11,77	8,74
$s_{к}$	14,7	11,77	8,74	8,15	8,15

n	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
n _B	0,56	0,80	1,08	1,87	2,02
μ	1,56	1,44	1,32	1,18	1,03
T	1150,00	1125,00	1100,00	1075,00	1050,00
f	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
f ₀	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
v _{оп}	700,00	700,00	700,00	700,00	700,00
t	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Далее представлен пример расчета энергосиловых параметров процесса прокатки для первой клетки стана.

По формуле (3) определим угол захвата для клетки №1:

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{2(216,5 - 209,5)}{301,14}} = 0,22 \text{ рад}.$$

Определим площадь контактной поверхности по формулам (4), (5):

$$F_k = \sqrt{2(216,5 + 209,5) \cdot 301,14} \cdot \frac{216,5 + 209,5}{2} = 13830,18 \text{ мм}^2.$$

В соответствии с формулой (11) z_y в вершине калибра будет равна:

$$z_{y0} = 64,93 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,56}{1,56 - 1} \right) \left(1 - \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,53 \cdot 301,14}{1185,76} \right)} \right] = 16,48 \text{ мм}.$$

Координата z_y на продольной границе очага деформации определим по формуле (12):

$$z_{y0} = 64,93 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1,56}{1,56 - 1} \left[1 - \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,53}{1185,76} \left(\frac{301,14 + 338,54 - \sqrt{338,54^2 - \frac{(216,5 + 209,5)^2}{4}}}{4} \right) \right]} \right] = 16,46 \text{ мм}.$$

Усредненное по объему очага деформации сопротивление металла пластической деформации определим по формуле:

$$\sigma_{sc} = \left(4,8054 - \frac{3,3483 \cdot 1150}{1000} + 0,646 \left(\frac{1150}{1000} \right)^2 \right)^3 = 59,22 \text{ H/мм}^2.$$

Из выражения (17) определим σ_1 :

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & \frac{2 \cdot 0,4 \cdot 59,22 \cdot 64,93 \cdot 1,56 \left(\frac{2 + 1,56}{3 \cdot 1,56} - \frac{700}{700} \right) - \frac{0,4 \cdot 59,22 \cdot 1,56 (216,5 + 209,5)}{2\pi \cdot 26,9(2 \cdot 216,5 - 26,9)}}{26,9(2 \cdot 216,5 - 26,9)} \\ & \cdot \left[2 \cdot 16,47 \left\langle 1 - \frac{1,56 - 1}{1,56} \frac{16,47}{64,93} \left(1 + \frac{16,47}{2 \cdot 64,93} \right) \right\rangle - 64,93 \frac{2 + 1,56}{3 \cdot 1,56} \right] + \\ & + 1,15 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{59,22 \cdot 1,56 (216,5 + 209,5 - 365,2)}{26,9(2 \cdot 216,5 - 26,9)}} \left[\frac{64,93^2}{2(216,5 - 26,9)301,14} + \frac{1,56 - 1}{1,56} (1 - 64,93) - \right. \\ & \left. - \frac{5 \cdot 64,93^2}{12(216,5 - 26,9)301,14} \right] = 15,49 \end{aligned}$$

По формуле (1) определим величину среднего давления на контакте с рабочими валками:

$$\begin{aligned} p_{cp} = & \frac{3,14}{3 \cdot 13830,18 \cdot \sin \frac{0,22}{2}} [26,9 \cdot 59,22 \cdot (433 - 26,9)] - 0,4 \cdot 59,22 \cdot \\ & \cdot \frac{3507,57 - 10322,61}{13830,18} \operatorname{ctg} \frac{0,22}{2} = 305,85 \text{ H/мм}^2. \end{aligned}$$

Усилие на валки:

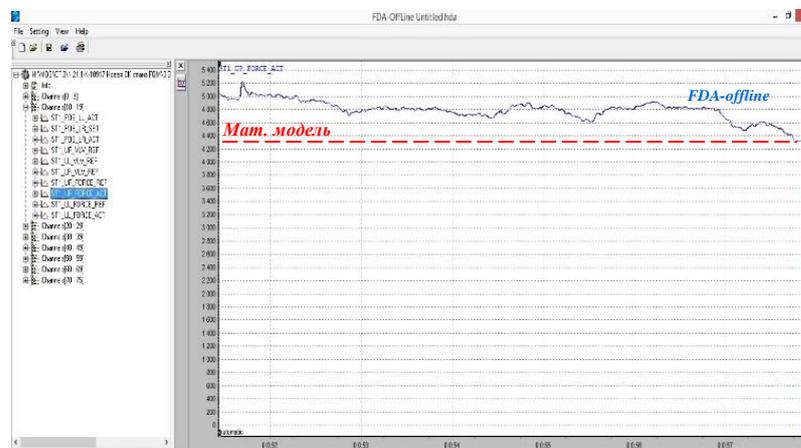
$$P = 305,85 \cdot 13830,18 = 4,23 \text{ МН}.$$

Давление, действующее на оправку в пределах очага деформации определяется из условия равновесия проекций сил на радиальное направление по формуле (2):

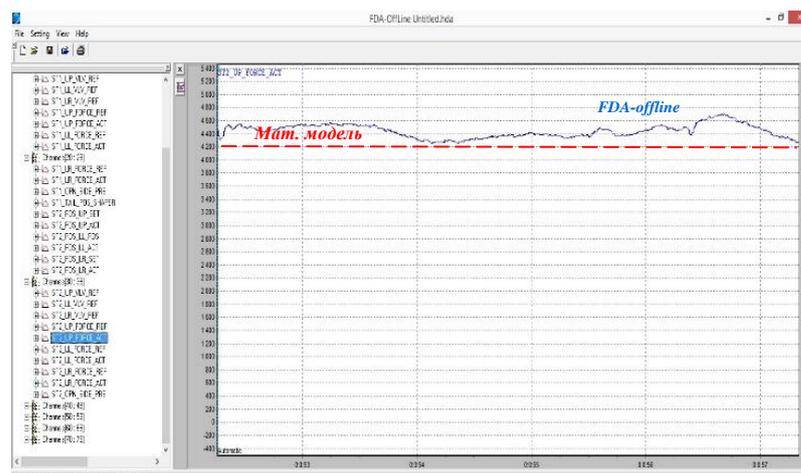
$$P_{on} = 240,04 \frac{13830,18}{4610,06} \cos \frac{0,22}{2} - 0,4 \cdot 59,22 \frac{3507,57 - 10322,61}{13830,18} \sin \frac{0,22}{2} = 1,94 \text{ МН}.$$

Для проверки адекватности разработанной методики и алгоритма расчета энергосиловых параметров процесса прокатки проведено

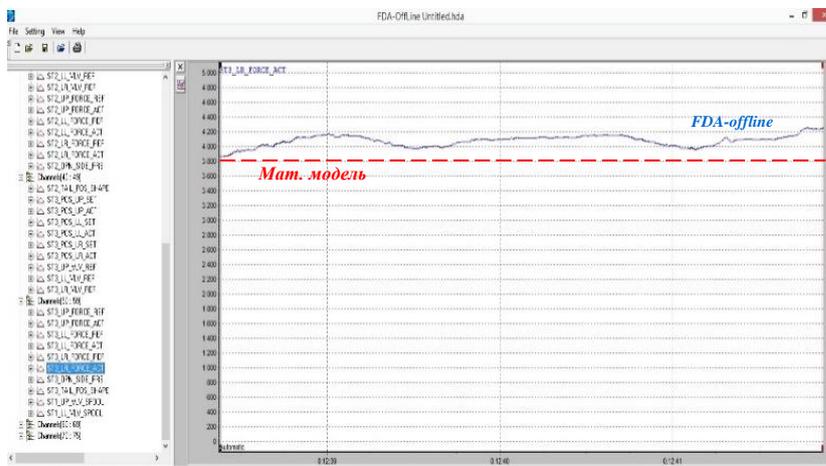
сопоставление результатов с производственными данными. Анализ результатов осуществлен с использованием программы FDA-offline для установившегося режима прокатки (рисунок 4).



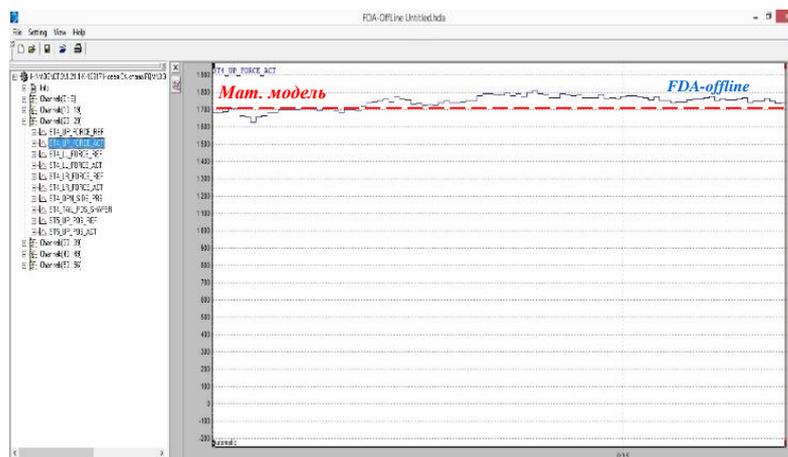
а



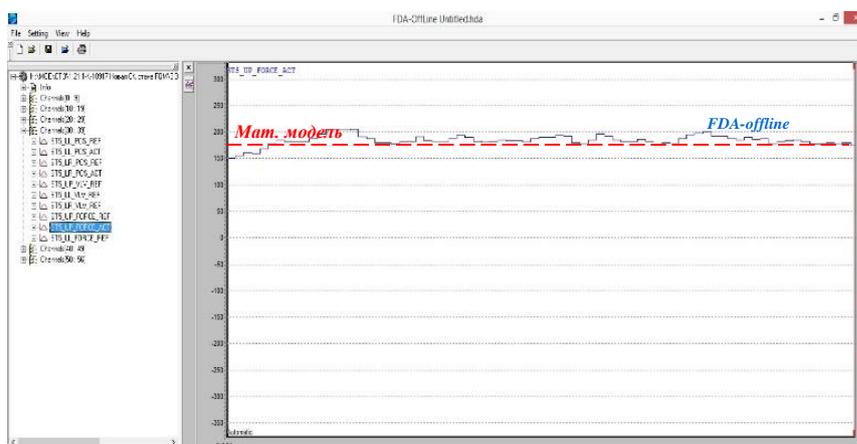
б



в



Г



Д

Рисунок 4 – Фактическое усилие на валки в клетях стана при прокатке труб наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 8,0 мм:

а – Клеть №1; б – Клеть №2; в – Клеть №3; г – Клеть №4; д – Клеть №5

Сопоставление результатов расчета с производственными данными показало высокую степень сходимости (рисунок 5), особенно в последних (чистовых) клетях стана, что в свою очередь подтвердило, во-первых, правомерность гипотезы по определению величины секундного объема и, во-вторых, адекватность разработанного алгоритма и математических моделей.

Полученное различие между усилиями на валки для черновых клетей стана, определенными расчетным путем и замеренными в производственных условиях, может быть обусловлена погрешностью определения площади контактной поверхности. Поскольку при тестовом расчете границы контактных площадей определялись только из геометрических зависимостей.

В то же время, при непрерывной прокатки протекают такие физические процессы, как свободное формоизменение (например, уширение).

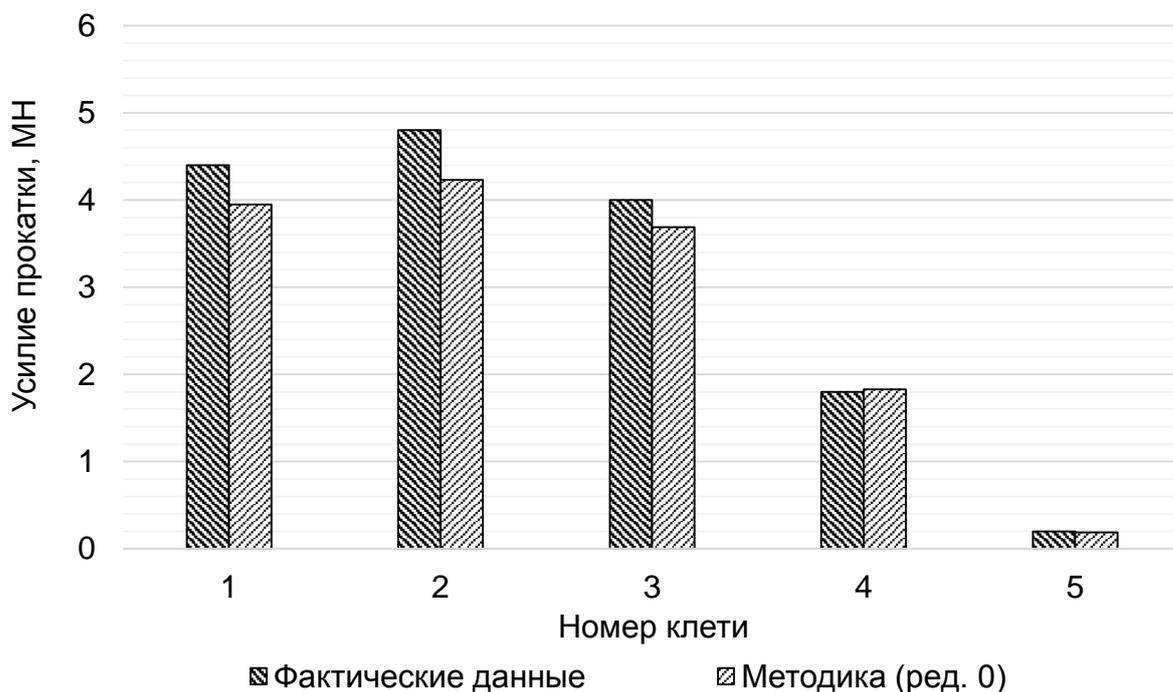


Рисунок 5 – Результаты сопоставления величины усилия на валки по клетям непрерывного стана

Учесть аналитическим путем указанные параметры в формулах для расчета площадей контакта возможно, но это приведет существенному усложнению задачи при сравнительно небольшой в абсолютном выражении повышении точности. Фактически это превратит задачу в расчет с помощью конечных элементов. Поэтому для решения проблемы предложено использовать эмпирические зависимости, для чего необходимо провести дополнительные исследования.

Выводы по главе 2

1. На основе энергостатического метода разработаны алгоритм и методика расчета энергосиловых параметров процесса прокатки. В частности, предложена методика упрощенного определения величины секундного объема при непрерывной прокатке и разработаны математические модели, позволяющие численно

определять усилие на валки и оправку в процессе деформации гильзы по клетям непрерывного раскатного стана.

2. Численная оценка, разработанного алгоритма показала, что расчет усилий на валки выполняется с достаточно высокой точностью, особенно для чистовых клетей стана.
3. Расхождение усилий на валки в черновой группе клетей, предположительно обусловлено тем, что расчет площади контактной поверхности осуществлен по упрощённой (принятой) методике, которая не учитывает характер действительного формоизменения раската.
4. Соответственно для определения параметров формоизменения раската в черновой группе и актуализации формулы расчета площади контактной поверхности необходимо провести физическое моделирование.
5. Ввиду того, что в процессе деформации оправка перемещается медленнее черновой трубы, тем самым препятствуя продольному течению металла на поверхности контакта и приводя к дополнительным растягивающим напряжениям, необходимо провести дополнительные исследования и определить влияние скорости оправки на энергосиловые параметры процесса.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ НА ОПРАВКЕ

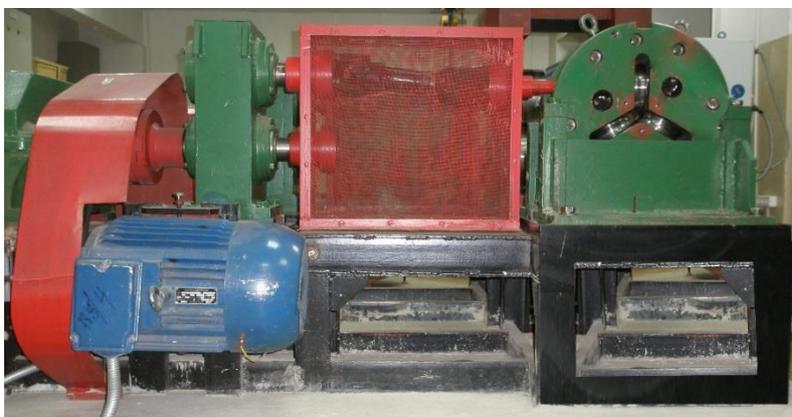
С целью дальнейшего совершенствования разработанной методики и алгоритма расчета энергосиловых параметров проведены дополнительные экспериментальные исследования на основе физического моделирования для выявления закономерностей уширения и угла охвата оправки, необходимые для более точного расчета площади контактной поверхности по клетям стана, способствующей повышению точности рассчитываемых по разработанной методике параметров.

Для выявления влияния скорости оправки на энергосиловые параметры процесса проведено компьютерное моделирование в среде Qform-3D.

3.1. Физическое моделирование

3.1.1. Экспериментальное оборудование, мерительный инструмент и материалы

Экспериментальные исследования процесса раскатки полых заготовок на оправке осуществлялось в условиях ОАО «РосНИТИ» на лабораторном прокатном стане. Лабораторный прокатный стан представляет из себя раму сварной конструкции с установленными на ней клетями с 3-валковыми калибрами и приводом (рисунок 6).



а



б

Рисунок 6 – Общий вид:

а – лабораторного прокатного стана; б – валкового узла

Передача крутящего момента между валками осуществляется через конические шестерни. Настройка калибра, в частности контроль межвалкового зазора, осуществлялся с использованием набора прямых удлиненных щупов. Для регулировки валков в боковом направлении осуществлялась установка подкладок требуемой толщины под посадочные плоскости каждого валка. Для визуализации и задания основных технологических параметров процесса прокатки, в частности частоты вращения валков, на центральном пульте управления станом установлена многофункциональная операторская панель с сенсорным экраном.

Технические характеристики лабораторного прокатного стана представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики лабораторного прокатного стана

№	Параметр	Ед. измерен ия	Величина
1	Двигатель:		4A160
	– тип		M4У3/M100
	– мощность;	кВт	18,5
	– частота вращения вала;	об/мин	1500
	– напряжение питания	В	380
2	Условный диаметр валков	мм	170
3	Ширина валка	мм	40
4	Максимальное усилие прокатки	кН	80
5	Максимальный крутящий момент на валке	кНм	2,5
6	Скорость прокатки	м/с	0...0,21
7	Габариты блока	мм	2290×1111×1173

В качестве модельного материала использовались свинцовые полые заготовки, предварительно обточенные на токарном станке (рисунок 7). Экспериментальные исследования процесса раскатки на цилиндрической оправке проведены для гильз с разным отношением наружного диаметра к толщине стенки (d/s).

Геометрические параметры заготовок представлены в таблице 5. Зазор между оправкой и внутренним диаметром гильзы принят постоянной величиной равной 1,9 мм. Прокатка патрубков в трехвалковом калибре осуществлялась на цилиндрической оправке диаметром $31,6 \pm 0,1$ мм, с частотой вращения валков 5,0 об/мин. Эксперимент проведен с тройной кратностью повторения опытов.

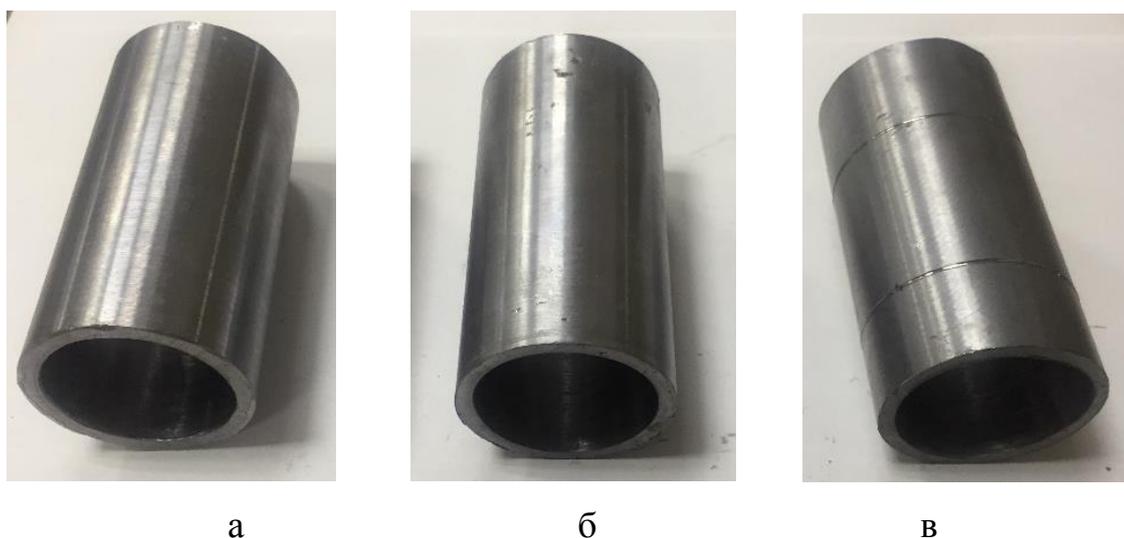


Рисунок 7 – Исходные полые заготовки (гильзы) с разным отношением d/s :

а – 14,2; б – 12,1; в – 10,9

Таблица 5 – Геометрические параметры гильзы

№ Эксперимента	№ Гильзы	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина, мм	d/s
1	1	41,2	2,9	90	14,2
	2				
	3				

2	4	42,4	3,5	90	12,1
	5				
	6				
3	7	43,4	4,0	90	10,9
	8				
	9				

Расточка ручья калибра в теле валка осуществляется в соответствии с рисунком 8. Геометрические параметры калибровки валков представлены в таблице 6.

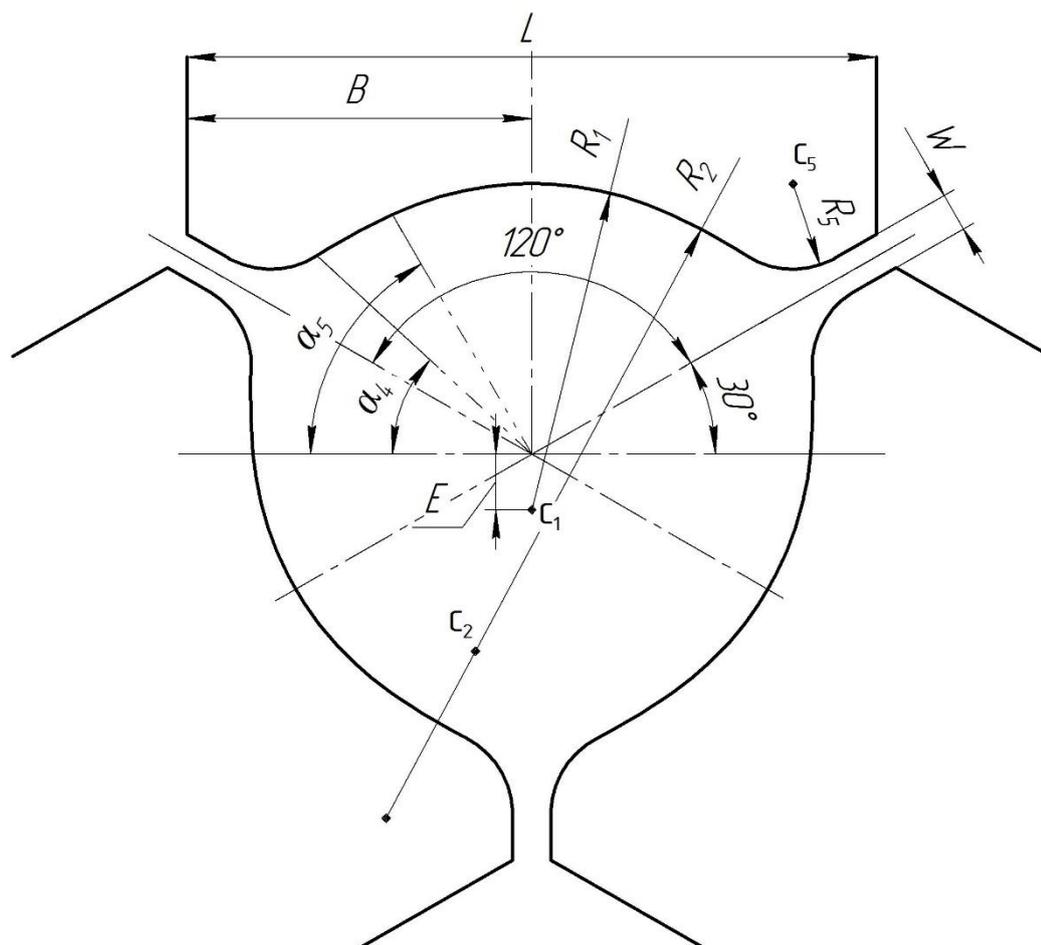


Рисунок 8 – К построению калибровки валков для проведения физического моделирования на лабораторном стане

Таблица 6 – Геометрические параметры калибра

Параметр	Усл. обозначение	Величина
Координаты центра радиуса галтели R5	xc5	16,7828
	yc5	16,2580
Координаты центра радиуса выпуска R2	xc2	-18,3429
	yc2	-31,8912
Координаты центра радиуса обжимной зоны R1	xc1	0,00
	yc1	-0,1205
Эксцентриситет	E	0,1205
Радиус галтели	R5	4,5714
Радиус выпуска	R2	55,0286
Радиус обжимной зоны	R1	18,3429
Угол сопряжения	α_4	41,69
Угол выпуска	α_5	60,00
Зазор между валками	W	2,46
Половина ширины валка	B	20,00
Ширина валка	L	40,00
Диаметр калибра	Dк	36,44
Диаметр по дну валка	ϕF_g	134,16
Номинальный диаметр валка	ϕN	170,60

3.1.2. Методика проведения экспериментального исследования

Перед прокаткой, для снижения трения между внутренней поверхностью заготовки и оправки наносилась графитовая смазка. Гильзы последовательно раскатывали в трехвалковом калибре в 2 прохода.

После каждого прохода осуществлялась обрезка некондиционных концевых участков раската в соответствии с рисунком 9, и осуществлялось сканирование поперечного сечения раскатанных образцов (рисунок 10) с

целью последующей обработки в системе автоматизированного проектирования Компас-2D.

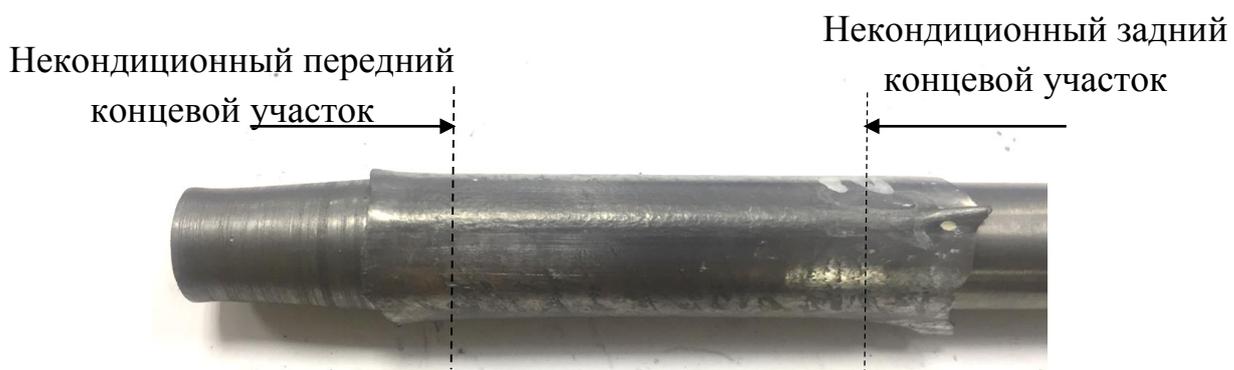


Рисунок 9 – Обрезка некондиционных концевых участков раската

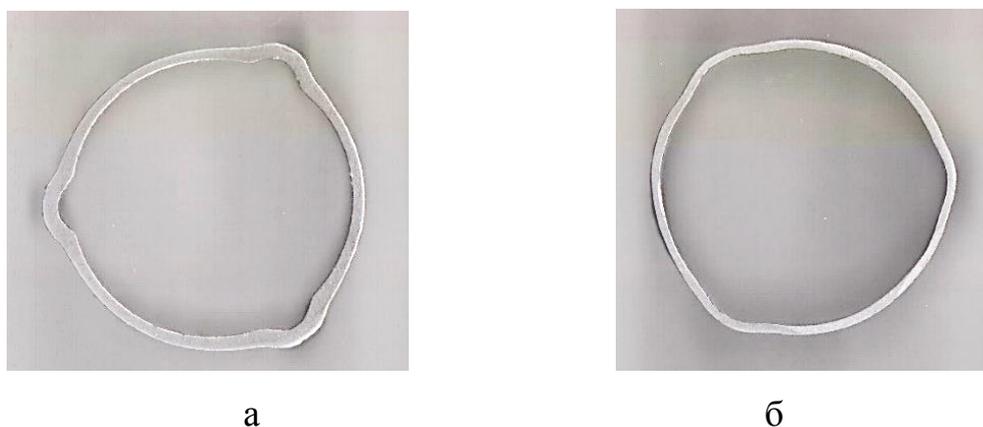


Рисунок 10 – Результаты сканирования поперечного сечения раската:

а – после первого прохода; б – после второго прохода

По результатам экспериментального исследования осуществлялась качественная и количественная оценка параметров формоизменения (рисунок 11) и характеристик точности раската.

Основные контролируемые параметры:

- показатель уширения раската, определен в соответствии с формулой

$$B_{\%} = \left| \frac{B_{i-1} - B_i}{B_{i-1}} \right| \cdot 100 \% . \quad (20)$$

где B_i , B_{i-1} – ширина раската, определяемая в соответствии с рисунком 11, в i -ой и $i-1$ -ой клетки;

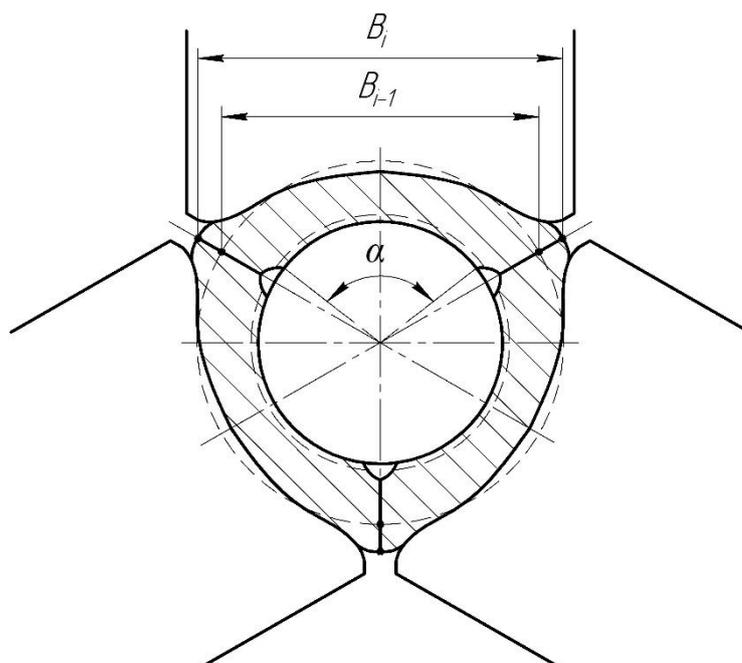


Рисунок 11 – К определению параметров формоизменения раската

- угол охвата оправки металлом, определен в поперечном сечении тела раската после обрезки переднего и заднего некондиционных концевых участков и удаления заусенцев, в соответствии с рисунком 6 по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i}{3}, \quad (21)$$

где α_i – угол охвата оправки со стороны каждого валка;

μ - фактические значения коэффициента вытяжки.

Фактические значения коэффициента вытяжки определялись в поперечном сечении тела раската после обрезки переднего и заднего некондиционных концов и удаления заусенцев в соответствии с формулой:

$$\mu_i = \frac{F_{i-1}}{F_i}, \quad (22)$$

где F_{i-1} – площадь поперечного сечения раската до прокатки;

F_i – площадь поперечного сечения после прокатки.

- толщина стенки в поперечном сечении тела раската измерялась в сечениях, соответствующих вершине калибра, линии разъёма калибров и в

трех точках, соответствующих промежуточной зоне калибра. Угол между соседними измеряемыми сечениями для 3-хвалковой схемы составлял – 15° (рисунок 12).

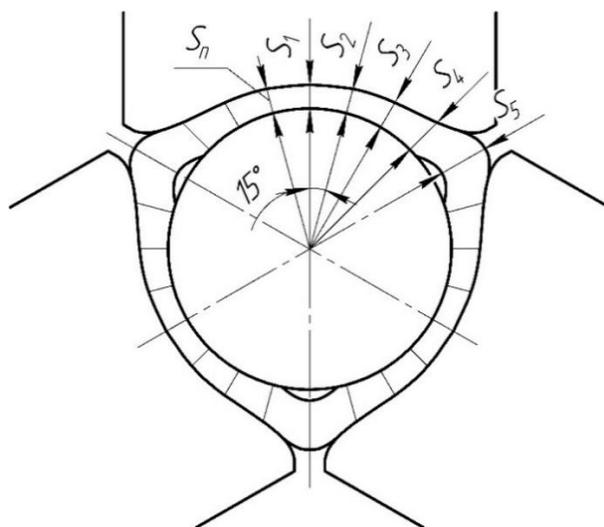


Рисунок 12 – К определению толщины стенки в поперечном сечении раската

3.1.3. Анализ результатов экспериментального исследования

Результаты экспериментального исследования представлены в таблицах 7-9 и на рисунках 13, 14.

Таблица 7 – Изменение коэффициента вытяжки после двух проходов

№ Эксперимента	d/s	№ Гильзы	Изменение площади поперечного сечения и коэффициента вытяжки				
			F_0	F_1	μ_1	F_2	μ_2
1 ($S_{ном}=2,9$ мм)	14,2	1	348,93	273,11	1,278	238,55	1,145
		2	348,93	271,06	1,287	235,19	1,153
		3	348,93	285,91	1,220	234,69	1,218
2 ($S_{ном}=3,5$ мм)	12,1	4	427,72	264,34	1,618	223,34	1,184
		5	427,72	282,85	1,512	230,82	1,225
		6	427,72	264,75	1,616	230,57	1,148
3 ($S_{ном}=4,0$ мм)	10,9	7	495,11	278,53	1,778	228,27	1,220
		8	495,11	285,8	1,732	228,73	1,250
		9	495,11	274,28	1,805	225,56	1,216

Таблица 8 – Изменение угла охвата оправки после двух проходов

№ Эксперимента	d/s	№ Гильзы	Угол охвата, град			
			α_1	$\alpha_{1отн}$	α_2	$\alpha_{2отн}$
1 ($S_{ном}=2,9$ мм)	14,2	1	294,01	0,817	187,64	0,521
		2	294,44	0,818	186,73	0,519
		3	293,06	0,814	186,44	0,518
2 ($S_{ном}=3,5$ мм)	12,1	4	308,55	0,857	194,94	0,542
		5	309,42	0,860	193,84	0,538
		6	312,10	0,867	194,67	0,541
3 ($S_{ном}=4,0$ мм)	10,9	7	322,96	0,897	202,75	0,563
		8	324,25	0,901	201,16	0,559
		9	327,05	0,908	203,27	0,565

Таблица 9 – Изменение уширения раската после двух проходов

№ Эксперимента	d/s	№ Гильзы	Уширение раската					
			B_0	B_1	ΔB_1	H_1	B_2	ΔB_2
1 ($S_{ном}=2,9$ мм)	14,2	1	35,68	34,59	-3,05	31,62	32,68	3,35
		2	35,68	34,48	-3,36	31,62	32,69	3,38
		3	35,68	34,60	-3,03	31,62	32,45	2,62
2 ($S_{ном}=3,5$ мм)	12,1	4	36,72	35,17	-4,22	31,62	32,53	2,88
		5	36,72	35,14	-4,30	31,62	32,86	3,92
		6	36,72	34,98	-4,74	31,62	32,84	3,86
3 ($S_{ном}=4,0$ мм)	10,9	7	37,59	35,65	-5,16	31,62	32,70	3,42
		8	37,59	35,86	-4,60	31,62	33,14	4,81
		9	37,59	36,06	-4,07	31,62	33,96	7,40

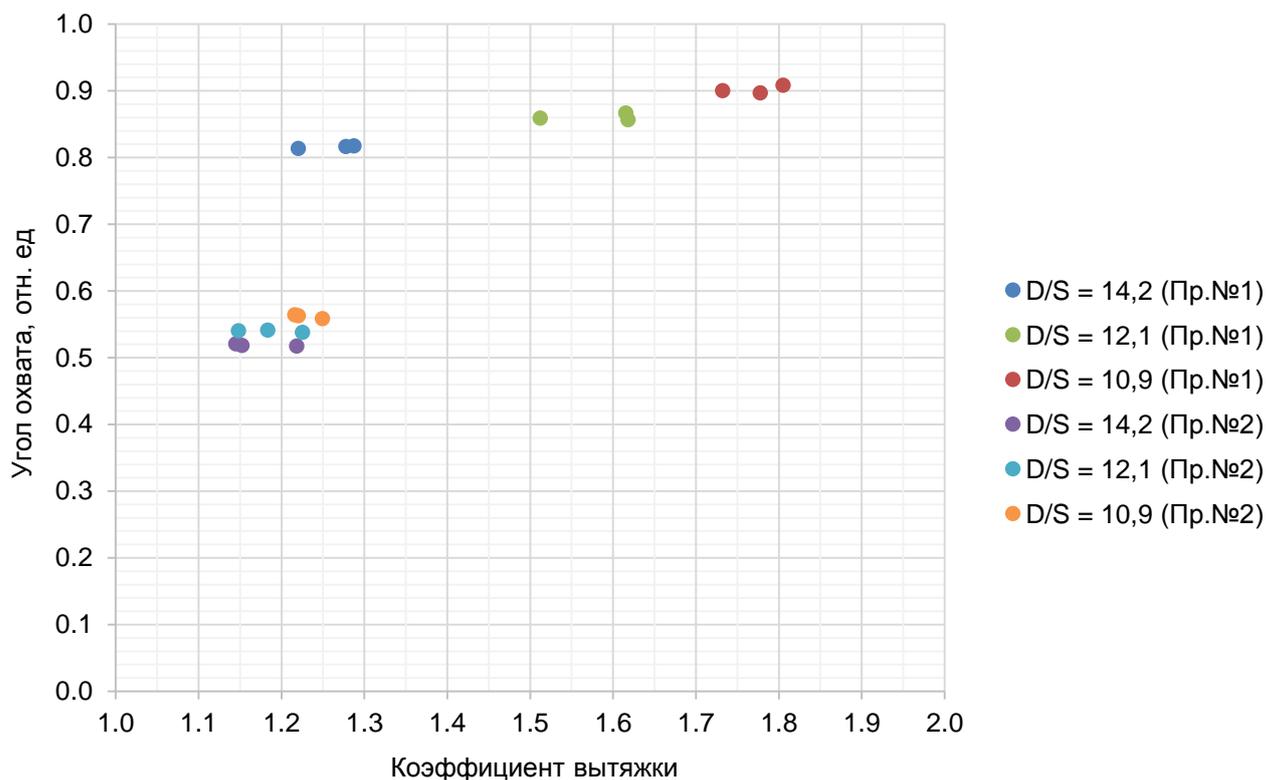


Рисунок 13 – Изменение угла охвата оправки после двух проходов в зависимости от коэффициента вытяжки

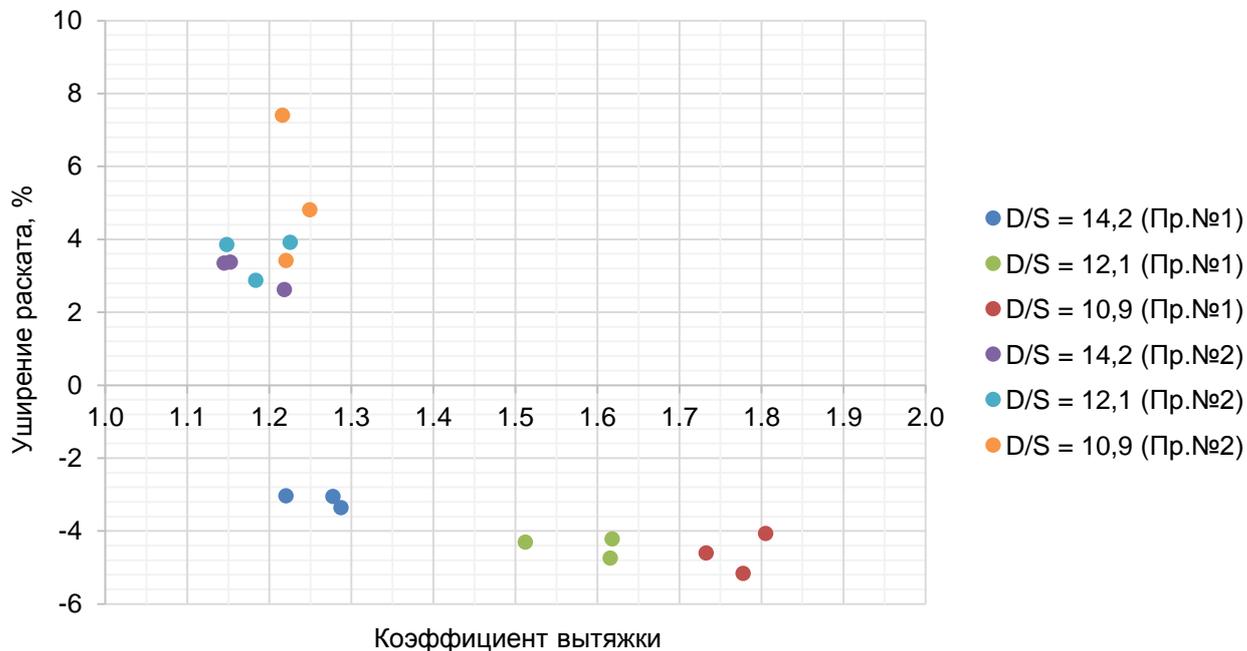


Рисунок 14 – Изменение уширения раската после двух проходов в зависимости от коэффициента вытяжки

Полученные экспериментальные данные далее использованы для построения эмпирических уравнений регрессии, описывающих зависимости

угла охвата оправки и уширения металла от коэффициента вытяжки. Влияние коэффициента d/s на эти параметры, как видно по рисункам 13, 14, не значительно.

3.1.4. Определение коэффициентов уравнения регрессия

В основе определения коэффициентов уравнения регрессии лежит метод наименьших квадратов и приемы матричной алгебры.

3.1.4.1. Зависимость для определения угла охвата оправки

Для определения численных значений уравнения регрессии по экспериментальным данным воспользуемся методом наименьших квадратов. Примем, что искомое уравнение является линейной зависимостью. Коэффициенты определим из условия минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных данных от расчетных или суммы квадратов невязок.

Невязка линейного уравнения записывается в виде

$$R_i = Y_i - A - BX_i \quad (23)$$

где Y_i - экспериментально определенное значение функции отклика;

X_i - соответствующее функции Y_i фактическое значение аргумента; A и B - искомые коэффициенты уравнения регрессии.

Для полученного уравнения условие минимума суммы квадратов невязок принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial A} \sum_{i=1}^{18} (Y_i - A - BX_i)^2 &= \sum_{i=1}^{18} \frac{\partial}{\partial A} (Y_i - A - BX_i)^2 = \sum_{i=1}^{18} 2(Y_i - A - BX_i) \frac{\partial}{\partial A} (Y_i - A - BX_i) = \\ &= -2 \sum_{i=1}^{18} (Y_i - A - BX_i) = 0; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial B} \sum_{i=1}^{18} (Y_i - A - BX_i)^2 &= \sum_{i=1}^{18} 2(Y_i - A - BX_i) \frac{\partial}{\partial B} (Y_i - A - BX_i) = \\ &= -2 \sum_{i=1}^{18} (Y_i X_i - AX_i - BX_i^2) = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

В результате система из двух линейных уравнений примет вид:

$$\begin{cases} 18 + B \sum_{i=1}^{18} X_i = \sum_{i=1}^{18} Y_i ; \\ A \sum_{i=1}^{18} X_i + B \sum_{i=1}^{18} X_i^2 = \sum_{i=1}^{18} X_i Y_i . \end{cases} \quad (26)$$

Для нахождения корней полученной системы уравнений воспользуемся методом Крамера. С этой целью вычислим следующие определители:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 18 & \sum_{i=1}^{18} X_i \\ \sum_{i=1}^{18} X_i & \sum_{i=1}^{18} X_i^2 \end{vmatrix} = 18 \sum_{i=1}^{18} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{18} X_i \right)^2 ; \quad (27)$$

$$\Delta_A = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{18} Y_i & \sum_{i=1}^{18} X_i \\ \sum_{i=1}^{18} X_i Y_i & \sum_{i=1}^{18} X_i^2 \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^{18} X_i^2 \sum_{i=1}^{18} Y_i - \sum_{i=1}^{18} X_i \sum_{i=1}^{18} X_i Y_i ; \quad (28)$$

$$\Delta_B = \begin{vmatrix} 18 & \sum_{i=1}^{18} Y_i \\ \sum_{i=1}^{18} X_i & \sum_{i=1}^{18} X_i Y_i \end{vmatrix} = 18 \sum_{i=1}^{18} X_i Y_i - \sum_{i=1}^{18} X_i \sum_{i=1}^{18} Y_i ; \quad B = \frac{\Delta_B}{\Delta} \quad (29)$$

В результате имеем:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{18} X_i^2 \sum_{i=1}^{18} Y_i - \sum_{i=1}^{18} X_i \sum_{i=1}^{18} X_i Y_i}{18 \sum_{i=1}^{18} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{18} X_i \right)^2} ; \quad (30)$$

$$B = \frac{18 \sum_{i=1}^{18} X_i Y_i - \sum_{i=1}^{18} X_i \sum_{i=1}^{18} Y_i}{18 \sum_{i=1}^{18} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{18} X_i \right)^2} . \quad (31)$$

Формулы (30) и (31) получены для линейного уравнения регрессии. В то же время, разброс точек, приведенный на рисунке 13, имеет явно нелинейный

характер. Дальнейший анализ результатов экспериментального исследования показал, что характер расположения экспериментальных точек может быть с достаточной степенью точности описан зависимостью вида:

$$\bar{\alpha} = a(\mu - 1)^b \quad (32)$$

где a и b – искомые эмпирические коэффициенты.

Для того, чтобы воспользоваться формулами (30) и (31) выполним линеаризацию уравнения (32). Для этого прологарифмируем обе части уравнения:

$$\ln(a) = \ln[a(\mu - 1)^b] = \ln a + b \ln(\mu - 1) \quad (33)$$

Вводим новые переменные и осуществляем перерасчёт экспериментальных значений по следующим формулам (таблица 10):

$$A = \exp a ; A = \ln a \quad (34)$$

$$Y = \exp(\bar{\alpha}) ; Y = \ln(\bar{\alpha}) \quad (35)$$

$$B = b \quad (36)$$

$$X = \ln(\mu - 1) \quad (37)$$

Результаты пересчета приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Коэффициенты уравнения регрессии (угол охвата оправки)

N $n.n$	μ	X	$\bar{\alpha}$	Y	XY	X^2
1	1,278	-1,280	0,817	-0,202	0,259	1,638
2	1,287	-1,248	0,818	-0,201	0,251	1,558
3	1,220	-1,514	0,814	-0,206	0,312	2,292
4	1,620	-0,478	0,857	-0,154	0,07	0,228
5	1,512	-0,669	0,86	-0,143	0,101	0,448
6	1,778	-0,251	0,867	-0,109	0,036	0,063

7	1,778	-0,251	0,897	-0,104	0,027	0,063
8	1,732	-0,312	0,901	-0,097	0,032	0,097
9	1,805	-0,217	0,908	-0,652	0,021	0,047
10	1,145	-0,931	0,521	-0,656	1,259	3,729
11	1,153	-1,887	0,519	-0,658	1,231	3,523
12	1,218	-1,523	0,518	-0,612	1,002	2,320
13	1,184	-1,693	0,542	-0,620	1,036	2,886
14	1,225	-1,491	0,538	-0,620	0,924	2,223
15	1,145	-1,931	0,541	-0,614	1,186	3,729
16	1,220	-1,514	0,563	-0,574	0,869	2,292
17	1,250	-1,386	0,559	-0,582	0,807	1,921
18	1,216	-1,532	0,565	-0,571	0,875	2,347
Σ		-21,098		-6,906	10,298	31,384

С учётом формулы (30) определяем коэффициент А:

$$A = \frac{31,384 \cdot (-6,906) - (-21,098) \cdot 10,298}{18 \cdot 31,384 - (-21,098)^2} = \frac{-216,738 + 217,267}{564,912 - 445,126} = \frac{0,529}{119,786} = 0,004$$

С учётом формулы (31) определяем коэффициент В:

$$B = \frac{1810,298 - (-21,098)(-6,906)}{119,786} = \frac{185,364 - 145,703}{119,786} = 0,331$$

Осуществляем обратный переход по формулам:

$$a = \exp(A) = \exp(0,004) = 1,004$$

$$b = B = 0,331$$

Таким образом, разброс экспериментальных точек, приведенных на рисунке 13 описывается следующей зависимостью:

$$\bar{\alpha} = 1,004 (\mu - 1)^{0,331} \quad (38)$$

Формула (38) без существенной потери точности может быть переписана в виде

$$\bar{\alpha} = (\mu - 1)^{0,331}$$

Диаграммы рассеяния экспериментальных точек и полученный график уравнения регрессии представлены на рисунке 15.

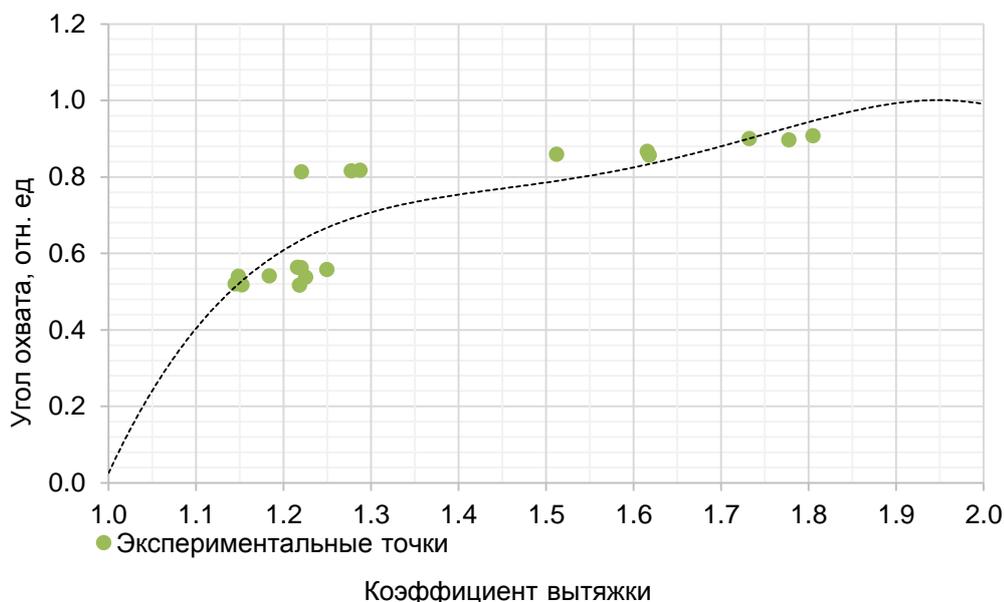


Рисунок 15 – Характер изменения угла охвата в зависимости от коoeffициента вытяжки

3.1.4.2. Зависимость для определения уширения раската

Аналогично п.3.1.4.1 для определения вида уравнения регрессии воспользуемся методом наименьших квадратов. Численные значения коoeffициентов уравнения регрессии определим по формулам (30) и (31). Анализ характера разброса точек, представленного на рисунке 14, показал, то он достаточно точно может описываться уравнением гиперболы вида:

$$\frac{\Delta B}{B} = a + \frac{b}{\mu} \quad (39)$$

где a и b – искомые коoeffициенты уравнения.

Не трудно заметить, что для линеаризации уравнения (39) достаточно принять в качестве аргумента величину $1/\mu$. Массив экспериментальной

информации для определения значений коэффициентов уравнения регрессии с учетом замены аргумента сведен в таблицу 11.

Таблица 11 – Коэффициенты уравнения регрессии (уширение раската)

№ п/п	μ	b	$1/\mu$	$1/\mu^2$	b/μ
1	1,277617	-3,05	0,782707	0,61263	-2,38726
2	1,28728	-3,36	0,776832	0,603468	-2,61016
3	1,220419	-3,03	0,819391	0,671401	-2,48275
4	1,618068	-4,22	0,618021	0,38195	-2,60805
5	1,51218	-4,3	0,661297	0,437314	-2,84358
6	1,615562	-4,74	0,61898	0,383136	-2,93396
7	1,777582	-5,16	0,562562	0,316476	-2,90282
8	1,732365	-4,6	0,577245	0,333212	-2,65533
9	1,805126	-4,07	0,553978	0,306892	-2,25469
10	1,144875	3,35	0,873458	0,762928	2,926083
11	1,152515	3,38	0,867668	0,752847	2,932717
12	1,218245	2,62	0,820853	0,673799	2,150634
13	1,183577	2,88	0,844897	0,71385	2,433303
14	1,225414	3,92	0,816051	0,665939	3,19892
15	1,148241	3,86	0,870897	0,758462	3,361663
16	1,220178	3,42	0,819553	0,671667	2,80287
17	1,249508	4,81	0,800315	0,640504	3,849515
18	1,215996	7,4	0,822371	0,676295	6,085548
Σ	24,6047	-0,89	13,50707	10,36277	6,062656

Вычислим коэффициенты а и b уравнения по известным формулам:

$$a = \frac{1}{n} \sum y_i - \frac{b}{n} \sum \frac{1}{x_i} = \frac{1}{18} \cdot (-0,89) - \frac{29,6295}{18} \cdot 13,50707458 \approx -22,2832 ; \quad (40)$$

$$b = \frac{n \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} \sum y_i}{n \sum \frac{1}{x_i^2} - \left(\sum \frac{1}{x_i} \right)^2} = \frac{18 \cdot 6,06265581 - 13,50707458 \cdot (-0,89)}{18 \cdot 10,36276999 - 13,50707458^2} \approx 29,6295 ; \quad (41)$$

Тогда, с учетом формул (40) и (41) искомое уравнение примет вид:

$$\frac{\Delta B}{B} = -22,2832 + \frac{29,6295}{\mu}. \quad (42)$$

Характер рассеяния экспериментальных точек и график уравнения регрессии (42) представлены на рисунке 16.

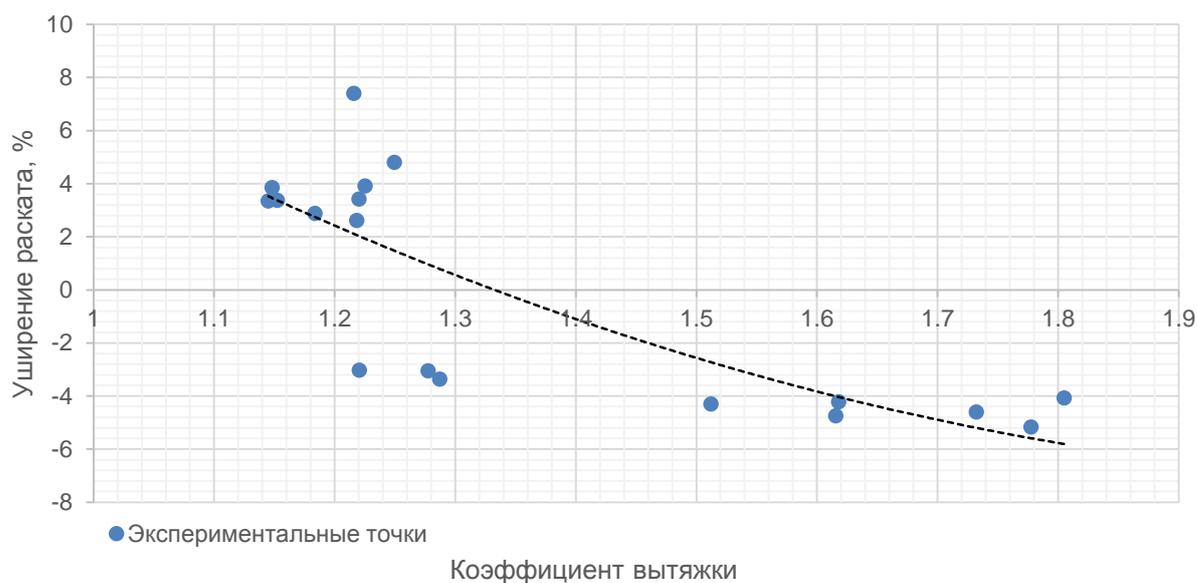


Рисунок 16 – Характер изменения уширения в зависимости от коэффициента ВЫТЯЖКИ

Исследования Я.Л. Ваткина и И.П. Савкина показали, что толщина стенки в выпуске калибра, как правило, претерпевает изменения. Толщина стенки по разьёму валков может, как утолщаться, так и утоняться относительно толщины стенки в вершине предыдущего калибра. При анализе

распределения толщины стенки в поперечном сечении раската было установлено, что с увеличением показателя d/s толщина стенки в выпуске калибра утоняется (рисунок 17).

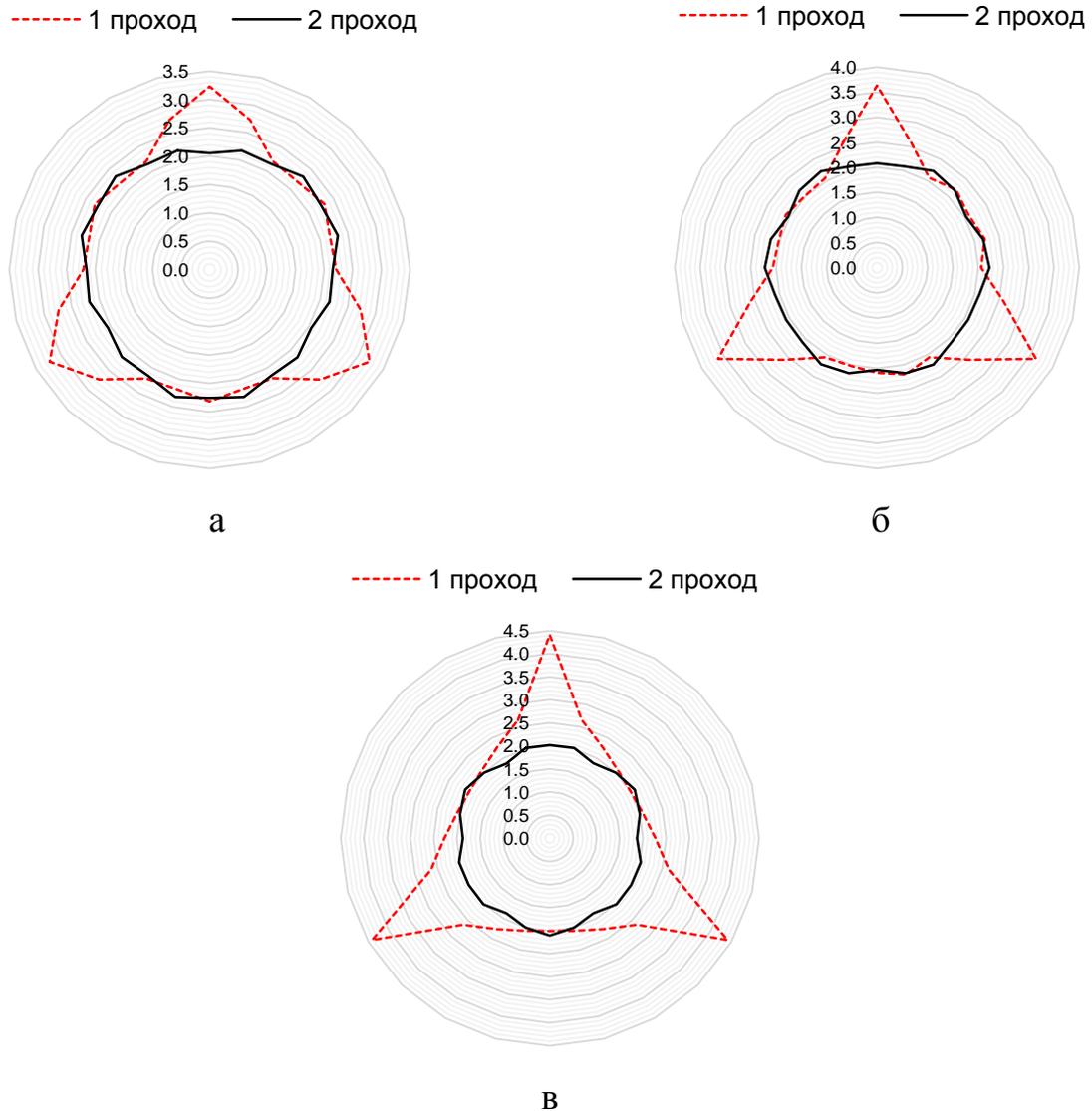


Рисунок 17 – Характер распределения толщины стенки после первого и второго проходов при прокатке заготовок с разным отношением d/s :

а – 14,2; б – 12,1; в – 10,9

В свою очередь, это хорошо коррелируется с результатами экспериментального исследования уширения раската (уширение с ростом коэффициента вытяжки уменьшается). Таким образом, серия проведенных экспериментов показала, что на величину угла охвата $\bar{\alpha}$ и коэффициента уширения $\frac{\Delta b}{b}$ основное влияние оказывает коэффициент вытяжки μ . Влияние

других факторов выражено менее заметно. Статистическая обработка полученной экспериментальной информации позволила получить следующие формулы:

- для угла охвата:

$$\bar{\alpha} = (\mu - 1)^{0,331}, \quad (43)$$

- для коэффициента уширения:

$$\frac{\Delta b}{b} = -0,223 + \frac{0,296}{\mu}. \quad (44)$$

3.2. Компьютерное моделирование

В данном разделе представлены основные результаты компьютерного моделирования процесса прокатки труб в непрерывном стане с учётом различных вариантов варьирования скорости перемещения оправки, реализованного в среде QForm-3D для труб тонкостенного сортамента с D/S от 40 до 50.

3.2.1 Исходные данные для проведения компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование процесса прокатки труб проведено с целью определения влияния скорости оправки на параметры процесса прокатки: усилие на валок, давление на оправку, угол охвата оправки, температура оправки, температура раската и напряженное состояние раската по клетям стана FQM. Настраечные параметры процесса прокатки представлены в таблицах 12-15.

Таблица 12 – Исходные параметры процесса прокатки труб (D/S=40)

Геометрические параметры гильзы, мм		Диаметр оправки, мм	Скорость удержания оправки, мм/с	Выдвижение оправки за первую клеть стана, мм	Температура гильзы	Коэффициент трения*	
Наружный диаметр	Толщина стенки					раскат – валок	раскат – оправка
328	20,55	276,9	700 (min)	3400	1100	0,4	0,1
			900 (nom)				
			1100 (max)				

* по закону Зибеля

Таблица 13 – Кинематические параметры процесса прокатки (D/S=40)

Скорость задачи гильзы в первую клетку стана, мм/с: 920				
№ Клетки	Диаметр калибра Dk, мм	Идеальный диаметр валков Di, мм	Коэффициент вытяжки μ	Частота вращения валков n, об/мин
1	300,22	950	1,492	35,58
2	295,80	945	1,424	52,96
3	292,39	940	1,254	68,40
4	290,80	720	1,162	116,75
5	290,80	720	1,049	126,19

Таблица 14 – Исходные параметры процесса прокатки (D/S=50)

Геометрические параметры гильзы, мм		Диаметр оправки, мм	Скорость удержания оправки, мм/с	Выдвижение оправки за первую клетку стана, мм	Температура гильзы	Коэффициент трения*	
Наружный диаметр	Толщина стенки					раскат – валок	раскат – оправка
433	26,9	365,2	490 (min)	3400	1100	0,4	0,1
			690 (nom)				
			890 (max)				

* по закону Зибеля

Таблица 15 – Кинематические параметры процесса прокатки (D/S=50)

Скорость задачи гильзы в первую клетку стана, мм/с: 792				
№ Клетки	Диаметр калибра Dk, мм	Идеальный диаметр валков Di, мм	Коэффициент вытяжки μ	Частота вращения валков n, об/мин
1	393,32	1010	1,572	33,91
2	388,31	990	1,451	51,28
3	382,84	970	1,304	65,98
4	381,07	770	1,193	119,40
5	381,07	770	1,049	130,06

3.2.2. Обработка результатов компьютерного моделирования

Обработка результатов компьютерного моделирования осуществлялась с использованием трассирующих точек, по которым регистрировались максимальные значения показателей напряжённого состояния в теле раската. Трассирующие точки №№ 1, 5 в первой клетке стана располагались в зоне вершины и выпуска калибра (рисунок 18). Динамика движения трассирующей точки №1 для первой клетки соответствует отслеживаемому маршруту: «клеть 1: точка №1 – клеть 2: точка №5». Выбранные трассирующие точки располагаются под углом в 15° относительно друг друга. Далее с использованием приложения Excel получали зависимость исследуемого параметра от времени и фиксировали максимальные значения исследуемых параметров.

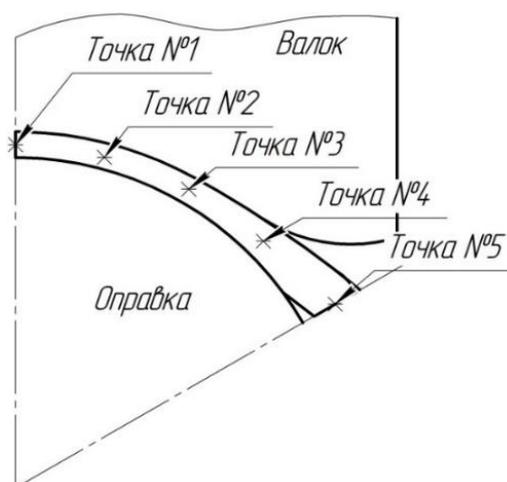


Рисунок 18 – Трассирующие точки для первой клетки стана

В качестве оценки напряжений, возникающих в теле раската при прокатке гильз, использован показатель напряжённого состояния раската [94], рассчитываемый в конечно-элементной компьютерной программе QForm-3D:

$$k = \frac{\sigma}{\tau}, \quad (45)$$

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

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

МПа;

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

Показатель σ/τ является основной величиной, характеризующей жёсткость напряжённого состояния, чем больше σ/τ , тем большую роль в схеме напряженного состояния играют растягивающие напряжения и тем больше вероятность образования дефектов.

При подаче заготовки в валки происходят следующие процессы. С одной стороны, охлаждение раската в результате теплопередачи между деформируемым металлом и валками через прослойку окалины. С другой стороны, происходит нагревание раската за счет диссипации механической энергии пластического формоизменения, а также работы внешних сил трения. На выходе из очага деформации, металл подвергается лучистому и конвективному теплообмену с окружающей средой и так далее.

Изменение поля температуры при деформации раската в клетях 1, 2 представлено на рисунке 19.

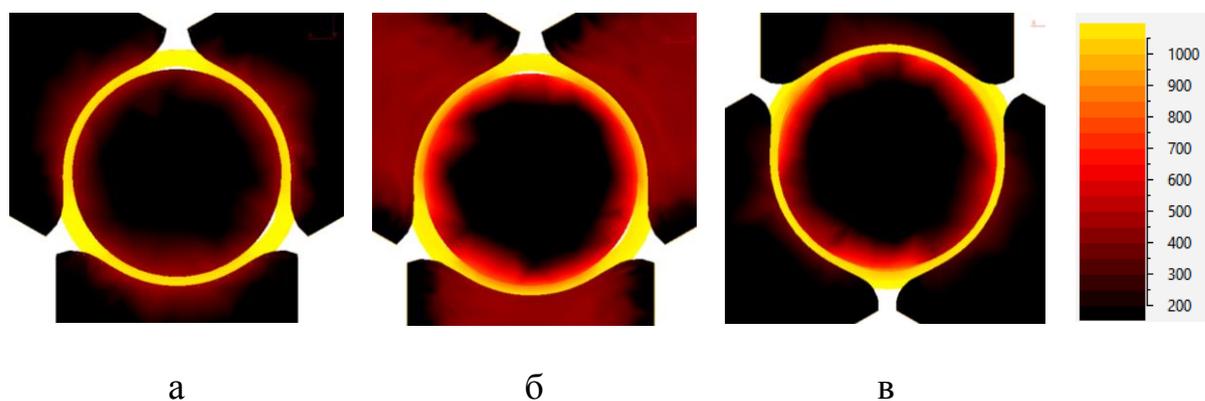


Рисунок 19 – Изменение поля температуры при раскатке гильз: а) в очаге деформации клетки №1; б) в межклетевом промежутке; в) в очаге деформации клетки №2

При определении угла охвата оправки строились изолинии изменения среднего напряжения по периметру поперечного сечения очага деформации в каждой клетке стана. Величина среднего напряжения в очаге деформации изменяется соответственно от максимально сжимающих (вершина калибра,

знак «-») до максимально растягивающим (линии разъема валков, знак «+»). В свою очередь в местах отрыва раската от оправки (в переходной зоне) величина среднего напряжения соответственно приближается к нулю (рисунок 20, изолинии оранжевого цвета).

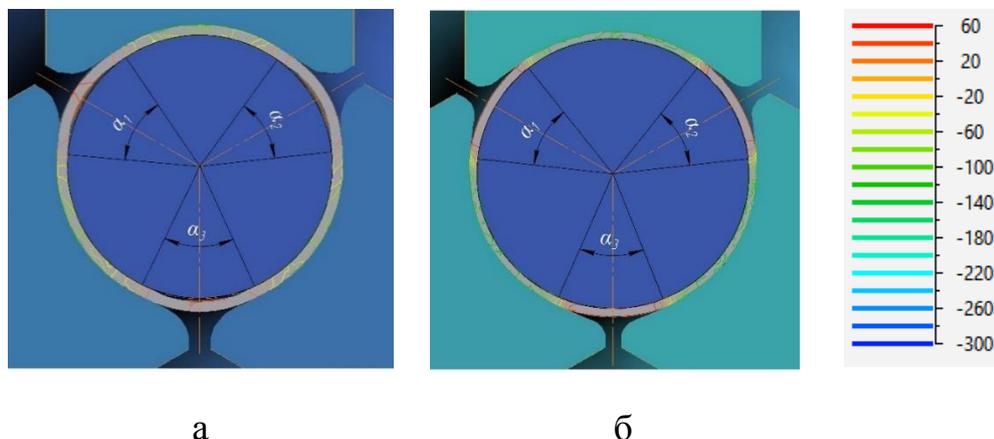


Рисунок 20 – К анализу угла охвата оправки: а) клеть №2; б) клеть №4

По полученным данным определяются границы отрыва раската от оправки со стороны двух смежных валков, и далее, с использованием приложения Компас-2D, определяется фактический угол охвата оправки в соответствии с формулой:

$$\varphi_{\Sigma} = 360 - \sum \alpha_i, \quad (46)$$

где α_i – угол отрыва раската от оправки со стороны двух смежных валков.

Продольное усилие, воздействующее на оправку при деформации раската в каждой клетке стана, определялось для установившегося процесса прокатки (рисунок 21). Полученные данные усреднялись относительно исследуемого диапазона.

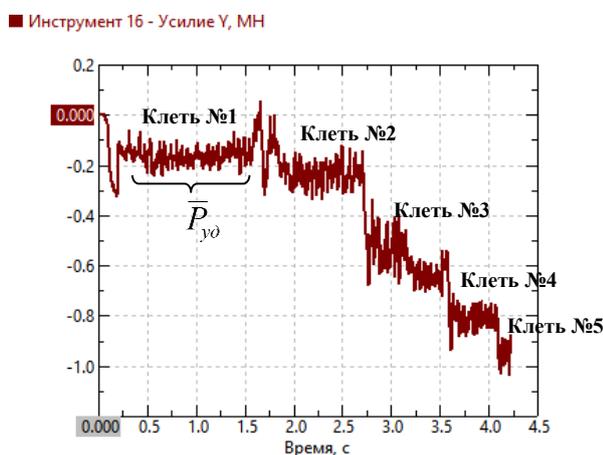


Рисунок 21 – Продольное усилие, воздействующее на оправку

3.2.3. Анализ результатов компьютерного моделирования

На основании полученных результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

- с увеличением скорости перемещения оправки показатель σ/τ в выпуске калибра (точка №5) снижается (рисунок 22), что в свою очередь оказывает благоприятное воздействие с точки зрения снижения риска образования дефектов в теле раската;

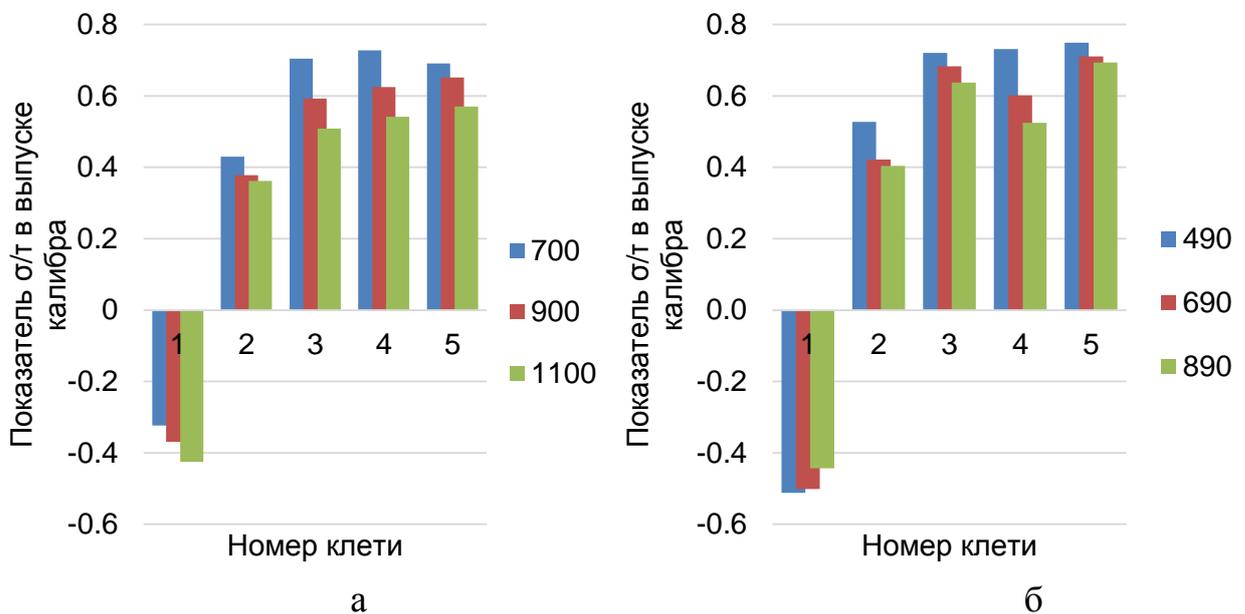


Рисунок 22 – Изменение показателя σ/τ в выпуске калибра (точка №5):

а – $D/S=40$; б – $D/S=50$

- с увеличением скорости перемещения оправки температура поверхностного слоя оправки и давление на оправках в обоих случаях снижаются (рисунки 23, 24). Причем наиболее явное снижение наблюдается в клетях 1, 2 стана;

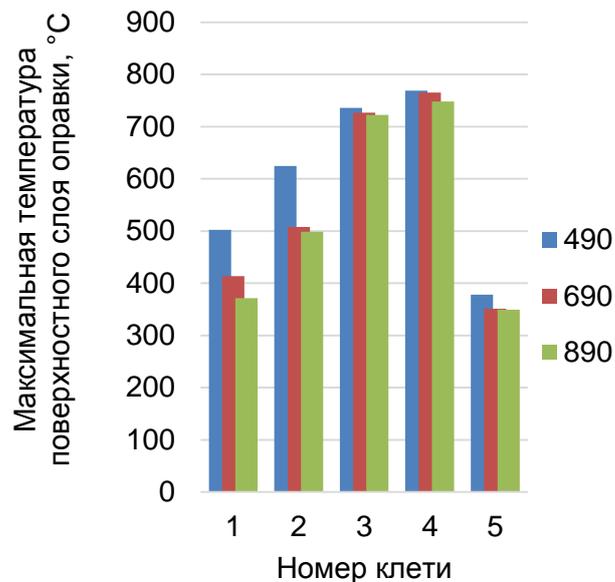
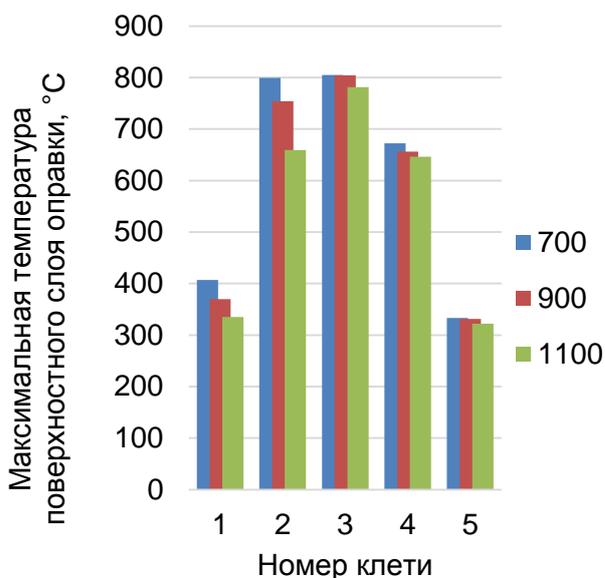


Рисунок 23 – Максимальная температура поверхностного слоя на оправке:
а – $D/S=40$; б – $D/S=50$

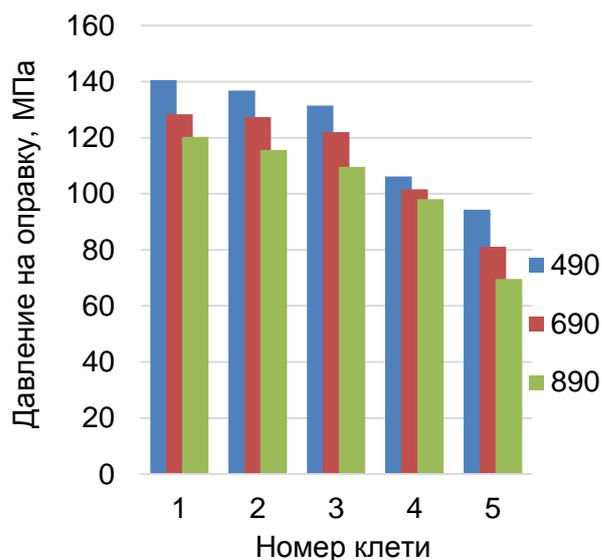
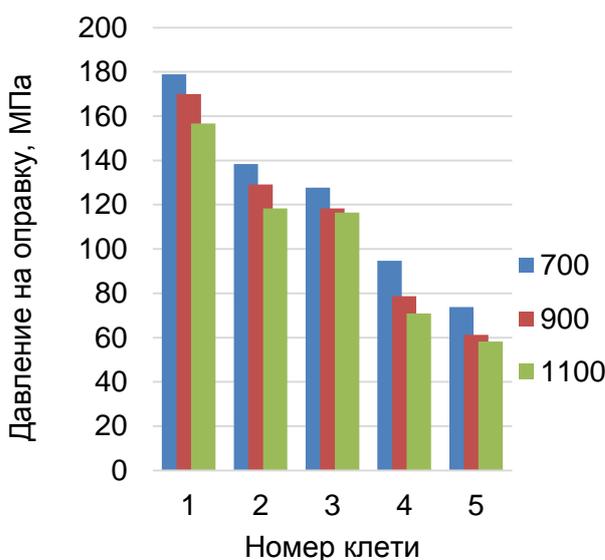


Рисунок 24 – Давление на оправку: а – $D/S=40$; б – $D/S=50$

- изменение скорости перемещения оправки в заданном диапазоне оказывает влияние на величину усилия на валки в пределах погрешности измерений (рисунок 25, ~ 50 кН), поэтому изменение скорости перемещения оправки не приведёт к возникновению аварийных ситуаций;

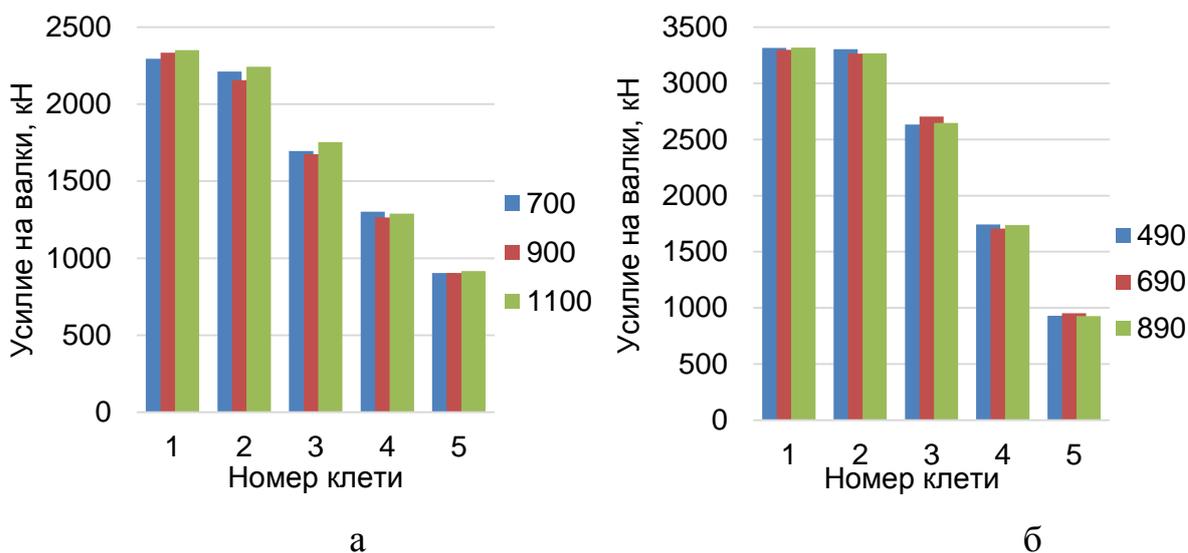


Рисунок 25 – Усилие на валки по клетям стана на оправке:

а – $D/S=40$; б – $D/S=50$

- с увеличением скорости перемещения оправки угол охвата оправки изменяется незначительно (рисунок 25), данное изменение скорости перемещения оправки не приведёт к возникновению аварийных ситуаций; кроме того, это свидетельствует о том, что полученная выше эмпирическая формула для расчета угла охвата оправки может быть использована в существующем диапазоне изменения скорости перемещения.

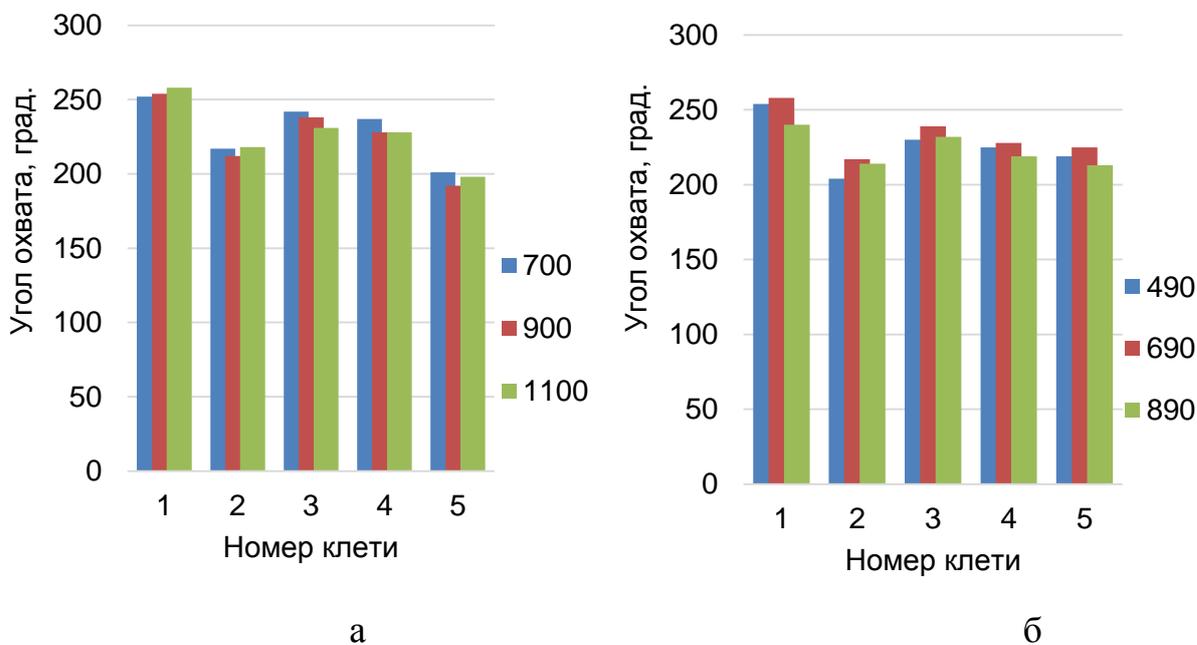


Рисунок 26 – Угол охвата оправки по клетям стана на оправке:

а – $D/S=40$; б – $D/S=50$

- с увеличением скорости перемещения оправки продольное усилие на оправку снижается (рисунок 27). Это согласуется с известными данными о том, что увеличение скорости скольжения приводит к снижению сил трения.

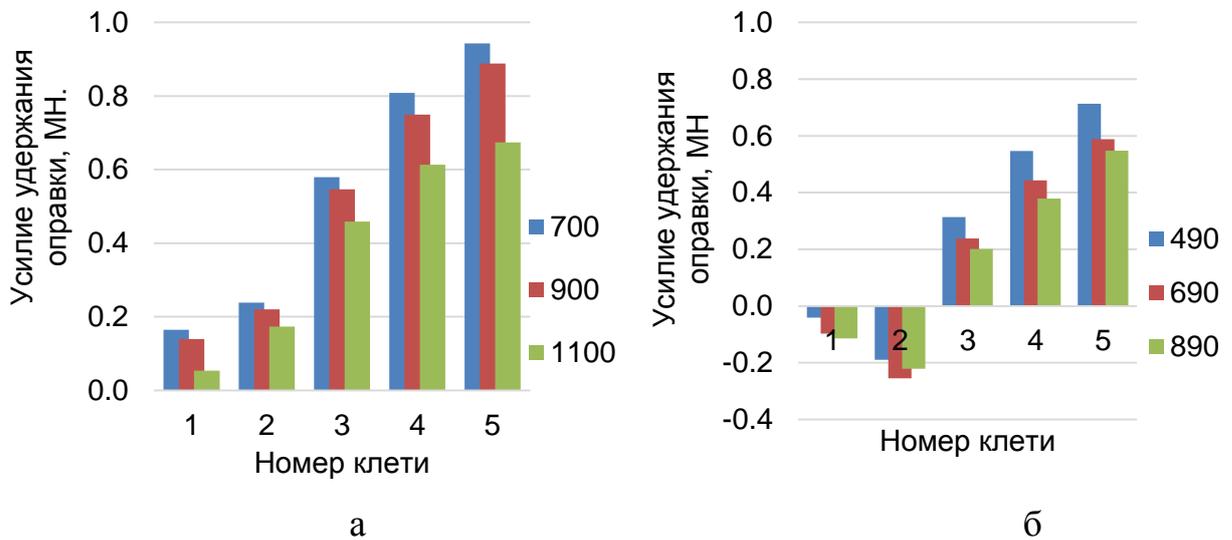


Рисунок 27 – Продольное усилие на оправку по клетям стана на оправке:

а – D/S=40; б – D/S=50

С учетом полученных данных был проведен дополнительный анализ параметров процесса прокатки (в частности отношение линейных скоростей оправки и вала, коэффициента вытяжки, а также величин обжатий толщины стенки по вершине калибра в каждой клетке стана) на распределение продольного усилия, действующего на оправку. Взаимосвязь данных параметров может быть определена из выражения:

$$k_{0_i} = \frac{v_{опр}}{v_{вал_i}} \cdot \mu_i \cdot \varepsilon_i, \quad (47)$$

где $v_{опр}$ – линейная скорость оправки;

μ_i – коэффициент вытяжки в i -ой клетке;

ε_i – относительное обжатие толщины стенки в вершине калибра i -ой клетки;

$v_{вал_i}$ – линейная скорость вала в i -ой клетке, определяемая по формуле:

$$v_{вал_i} = \pi D_{вал_i} n_i / 60, \quad (48)$$

$D_{вал_i}$ – диаметр вала по вершине в i -ой клетке;

n_i – частота вращения валков в i -ой клетке.

В ходе обработки данных получена уникальная математическая модель (рисунок 28), позволяющая оперативно определять усилие, действующее на оправку в зависимости от параметров процесса прокатки.

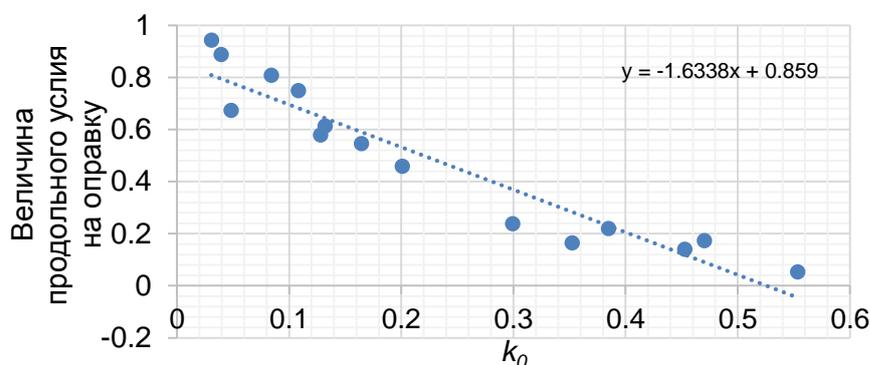


Рисунок 28 – Влияния параметров процесса прокатки на распределение продольного усилия на оправку

3.3. Уточнение разработанной методики и математической модели для расчета энергосиловых параметров процесса прокатки

В ходе обработки результатов экспериментального исследования были уточнены формулы для расчета:

- 1) площади контактной поверхности с оправкой и валками:

$$F_{ко} = l_{од} \left[\frac{\pi R_{к}}{90} \cdot 1,004 (\mu - 1)^{0,331} \right]; \quad (49)$$

$$F_{кв} = \frac{1}{2} b \cdot l_{од} \left[1,77 + \frac{0,296}{\mu} \right]. \quad (50)$$

- 2) продольное усилие, действующее на оправку:

$$k_{0_i} = -1,63 \cdot \frac{v_{опр}}{v_{вал_i}} \cdot \mu_i \cdot \varepsilon_i + 0,86. \quad (51)$$

Полученные формулы после подстановки в математическую модель расчета параметров процесса непрерывной раскатки труб на оправке позволяют уточнить получаемые результаты. При этом последовательность расчета будет следующей:

1. Принимаем скорость выхода трубы из стана равной средней линейной скорости валков последней клетки.

2. Через общий коэффициент вытяжки определяется скорость входа трубы в 1-ю клеть.

3. Определяется переднее натяжение в 1-й клетке (с учетом того, что заднее натяжение равно нулю).

4. Уточняется коэффициент вытяжки в первой клетке с учетом уширения и определяется скорость выхода металла из первой клетки.

5. Поскольку переднее натяжение на выходе из первой клетки является задним натяжением для второй клетки, по описанному выше алгоритму определяется переднее натяжение и скорость выхода металла для второй клетки.

6. Далее последовательность расчета повторяется вплоть до последней клетки непрерывного раскатного стана.

7. Выполненные расчеты позволяют определить скоростной режим и режим натяжений в непрерывном раскатном стане при заданном скоростном режиме валков.

8. После этого определяется давление на валки и оправку в каждой из клеток стана с учетом разработанных формул.

9. Момент на валках определяется по известным зависимостям (19)

Сопоставление результатов представлено на рисунке 29.

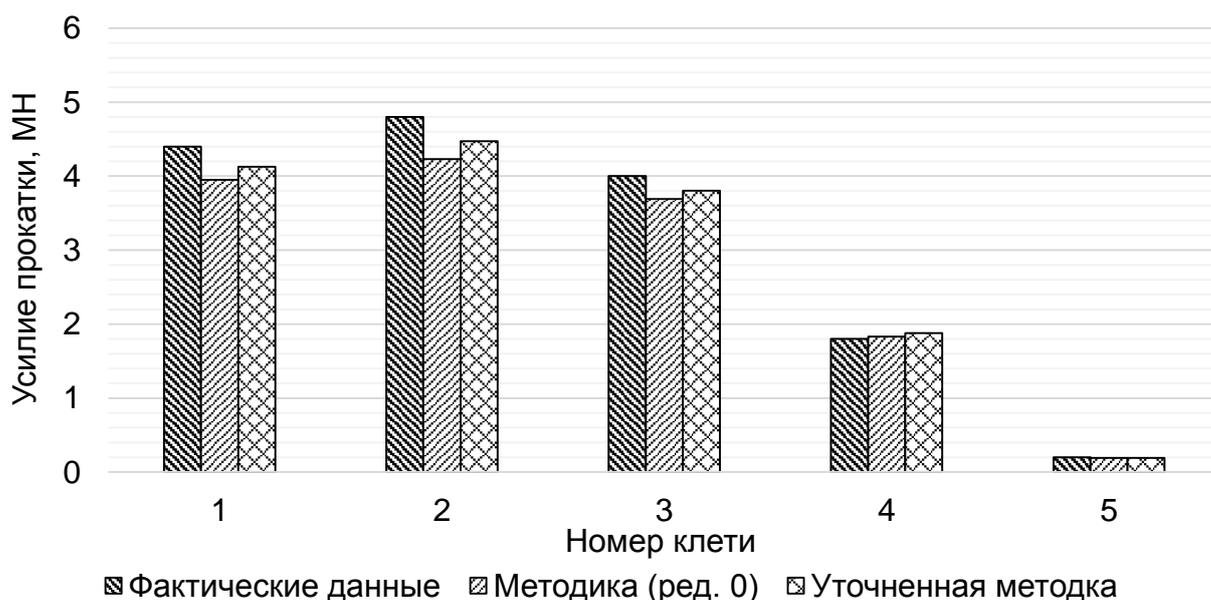


Рисунок 29 – Распределение усилий по клетям стана

Выводы по главе 3

1. На основании результатов физического моделирования получены экспериментальные зависимости для расчета угла охвата оправки и уширения раската, уточняющие математическую модель для расчета площади контактной поверхности.
2. На основании результатов компьютерного моделирования установлено, что с увеличением скорости оправки показатель напряженного состояния σ/τ в выпуске калибра, температура поверхностного слоя оправки и давление на оправку снижаются; изменение скорости оправки оказывает влияние на величину усилия прокатки в пределах погрешности измерений (~ 50 кН), поэтому её изменение не приведёт к возникновению аварийных ситуаций на стане.
3. Впервые получена уникальная математическая модель, позволяющая оценить продольное усилие, воздействующее на оправку во время заполнения непрерывного стана.
4. Уточненная методика позволяет получать более близкие к реальным значения усилия прокатки. Оставшаяся погрешность при этом для клетей 1, 2, 3 составляет примерно 0,55%. Первоначально разработанная методика уточнена на 6%.
5. На основе энергостатического метода и эмпирических зависимостей разработана уточненная методика расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз в многоклетевом раскатном стане, позволяющая с высокой степенью точности определять усилие прокатки в чистовых клетях и с погрешностью менее 1% определять усилие прокатки в черновых клетях стана.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАСТРОЙКИ НЕПРЕРЫВНОГО РАСКАТНОГО СТАНА

В данной главе с использованием полученной математической модели выполнен параметрический анализ и определены основные закономерности процесса непрерывной раскатки гильз на стане с удерживаемой оправкой. На основании полученных закономерностей разработаны технические предложения по повышению устойчивости процесса непрерывной раскатки гильз на удерживаемой оправке.

4.1. Автоматизированная методика расчета технологических параметров процесса непрерывной раскатки гильз

Архитектуру программного продукта целесообразно представить следующими основными блоками:

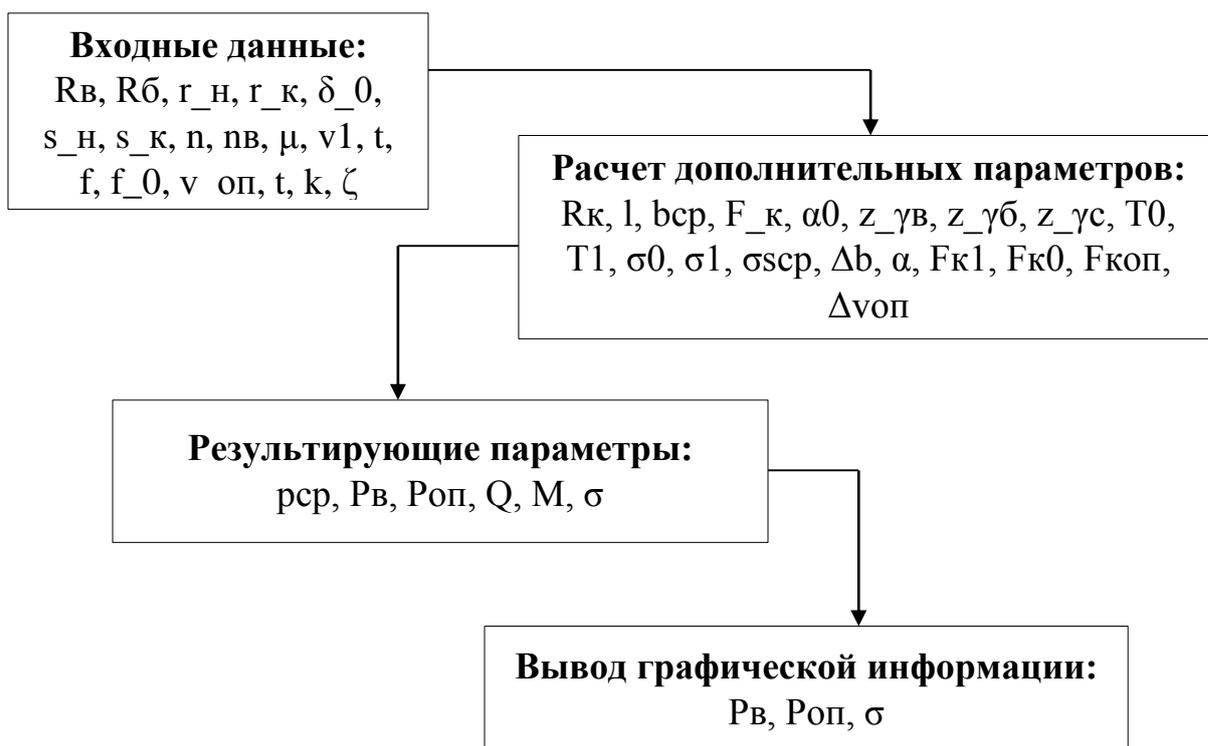


Рисунок 30 – Блока схема разрабатываемого программного продукта

Реализация программного продукта на основе разработанной методики осуществлена с использованием языка программирования C#. На рисунках 31-

34 представлен интерфейс программного продукта с отображением основных диалоговых окон.

Автоматизированная методика расчета энергосиловых параметров п... - □ ×

Входные параметры Расчетные параметры Результирующие параметры

	Клеть №1	Клеть №2	Клеть №3	Клеть №4	Клеть №5
▶ Rв	301,14	308,74	311,26	212,75	212,75
Rб	363,35	376,05	379,87	286,7	286,7
r_н	216,5	209,5	196,86	194,37	191,34
r_к	209,5	196,86	194,37	191,34	190,75
δ_0	365,2	365,2	365,2	365,2	365,2
s_н	26,9	26,9	14,26	11,77	8,74
s_к	14,7	11,77	8,74	8,15	8,15
n	3	3	3	3	3
σср	0	63,95	69,02	74,44	80,23
nv5	0,56	0,8	1,08	1,87	2,02
μ	1,56	1,44	1,32	1,18	1,03
v1	1185,76	1707,49	2260,71	2669,9	2750
t	1150	1125	1100	1075	1050
f	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
f_0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
v_оп	700	700	700	700	700
t	1	1	1	1	1
k	0,95	0,95	0,85	0,75	0,75

Вычислить Диаграмма

Рисунок 31 – Диалоговое окно для ввода исходных данных

Автоматизированная методика расчета энергосиловых параметров п... - □ ×

Входные параметры Расчетные параметры Результирующие параметры

	Клеть №1	Клеть №2	Клеть №3	Клеть №4	Клеть №5
▶ Rк	327,02	338,44	341,88	258,03	258,03
l	64,93	88,35	39,37	35,91	15,84
вср	213	203,18	195,61	192,85	191,04
F_кnew	14448,3	18970,72	7934,28	7116,36	3065,75
α0	0,22	0,29	0,13	0,17	0,07
z_γв	10,52	14,42	5,8	8,58	6,32
z_γб	10,51	14,39	5,8	8,58	6,32
z_γс	10,51	14,4	5,8	8,58	6,32
T0	205520,5	492454,2	187301,2	139910	55678,68
T1	205520,5	269849,9	205963,2	167992,7	60273,7
σ0	14,22	25,96	23,61	19,66	18,16
σ1	0	14,22	25,96	23,61	19,66
σср	59,22	63,95	69,02	74,44	80,23
Δb	-0,03	-0,02	0	0,03	0,06
α	0,83	0,77	0,69	0,57	0,31
Fк1	2339,33	3092,42	1169,13	1700,93	1222,33
Fк0	12108,98	15878,3	6765,16	5415,43	1843,42
Fкоп	4816,1	6323,57	2644,76	2372,12	1021,92
Δvоп	1,69	2,44	3,23	3,81	3,93

Рисунок 32 – Диалоговое окно с отображением расчета дополнительных параметров процесса прокатки

Автоматизированная методика расчета энергосиловых параметров п... - □ ×

Входные параметры | Расчетные параметры | Результирующие параметры

	Клеть №1	Клеть №2	Клеть №3	Клеть №4	Клеть №5
р _{ср}	252,66	200,91	394,15	210,21	170,22
P _в	3650479	3811391	3127321	1495926	521850,7
P _{оп}	1209764	1257485	1040358	496869	173829,9
Q	346795,5	362082,1	265822,3	112194,5	39138,8
M _з	231691,5	290330,9	152402	55774,29	14232,22
Δκ	0	0,22	0,38	0,32	0,25
		1-2	2-3	3-4	4-5

Рисунок 33 – Диалоговое окно с отображением расчета основных параметров процесса прокатки

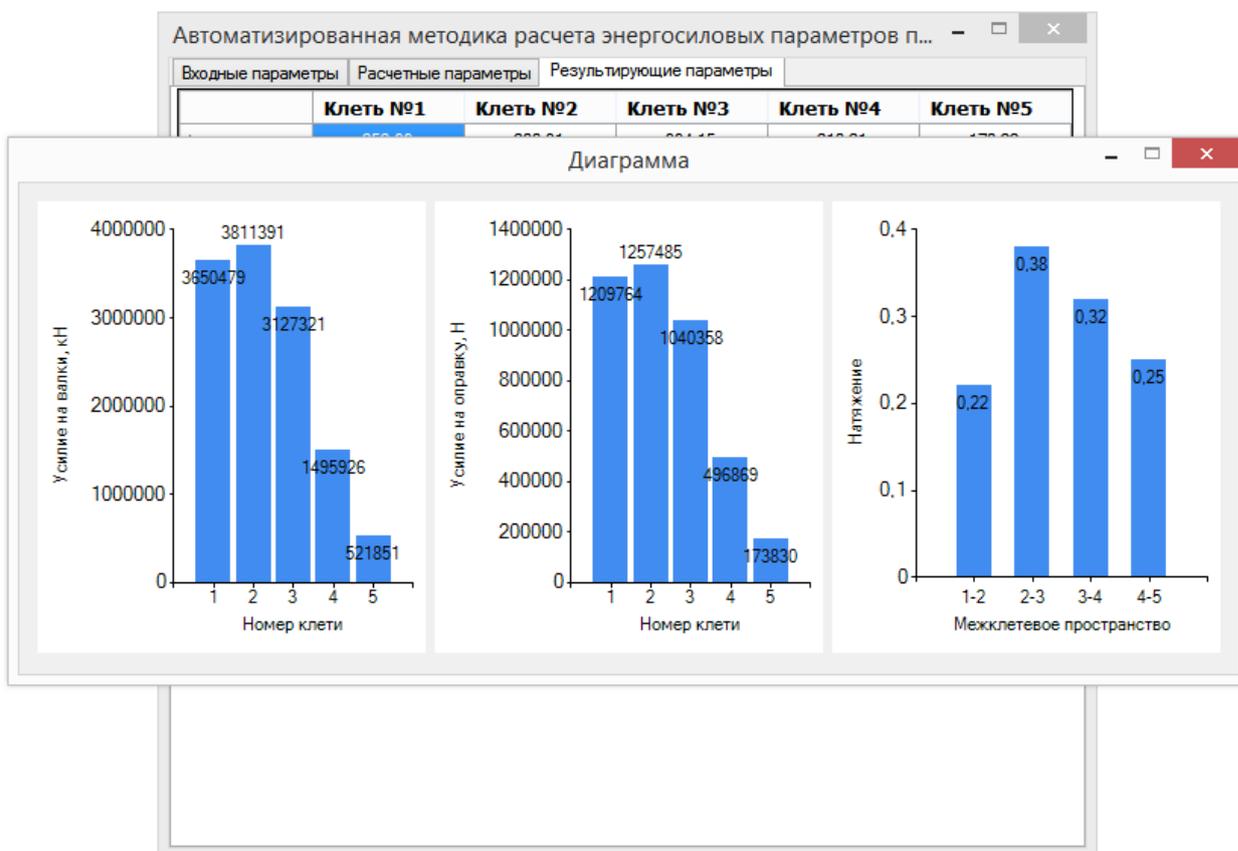


Рисунок 34 – Графическое отображение расчетных параметров

4.2. Параметрический анализ процесса непрерывной раскатки

ГИЛЬЗ

Процесс раскатки гильз на непрерывном стане является сложным, многосвязным процессом. В результате взаимодействия клеток стана через деформируемый металл и оправку любое изменение любого параметра в любом месте непрерывного стана приведет к изменению всех технологических параметров процесса. Поэтому, при определении характера изменения настроечных параметров в случае надобности, необходимо знать закономерности, которым подчиняется процесс непрерывной прокатки. Соответственно, для разработки методики настройки непрерывного стана необходимо осуществить с использованием компьютерного моделирования параметрический анализ. В данной работе с помощью параметрического анализа исследовано влияние на энергосиловые параметры процесса следующих величин (рисунок 35):

- толщины стенки гильзы;
- наружного диаметра гильзы;
- температуры гильзы;
- коэффициента трения в системе валок-раскат;
- скорости оправки стана;
- частоты вращения валков стана.

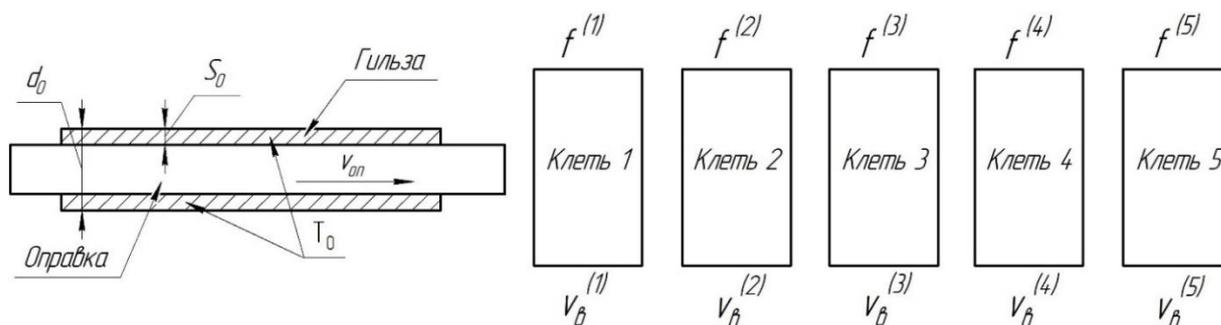


Рисунок 35 – Непрерывная прокатка:

d_0 – наружный диаметр гильзы; S_0 – толщина стенки гильзы;

T_0 – температура гильзы; $v_{он}$ – скорость оправки; $v_{в}$ – скорость валков;

f – Коэффициент трения в системе валок-раскат

Диапазон изменения исследуемых параметров от номинального значения представлен в таблице 16.

Таблица 16 – Варьируемые параметры

№ п/п	Варьируемый параметр	Единицы измерения	Номинальное значение	Диапазон изменения
1.	Толщины стенки гильзы	мм	26,9	$\pm 2,0$
2.	Наружный диаметр гильзы	мм	433	$\pm 5,0$
3.	Температура гильзы	$^{\circ}\text{C}$	1150	$\pm 20,0$
4.	Коэффициент трения в системе валок-раскат	-	0,4	$\pm 0,1$
5.	Скорость перемещения оправки	мм/с	700	± 200
6.	Частота вращения валков	об/с	0,56	$\pm 1,05$

Анализ изменения толщины стенки гильзы.

Распределение усилий и натяжения по клетям стана при изменении толщины стенки гильзы представлено на рисунках 36, 37.

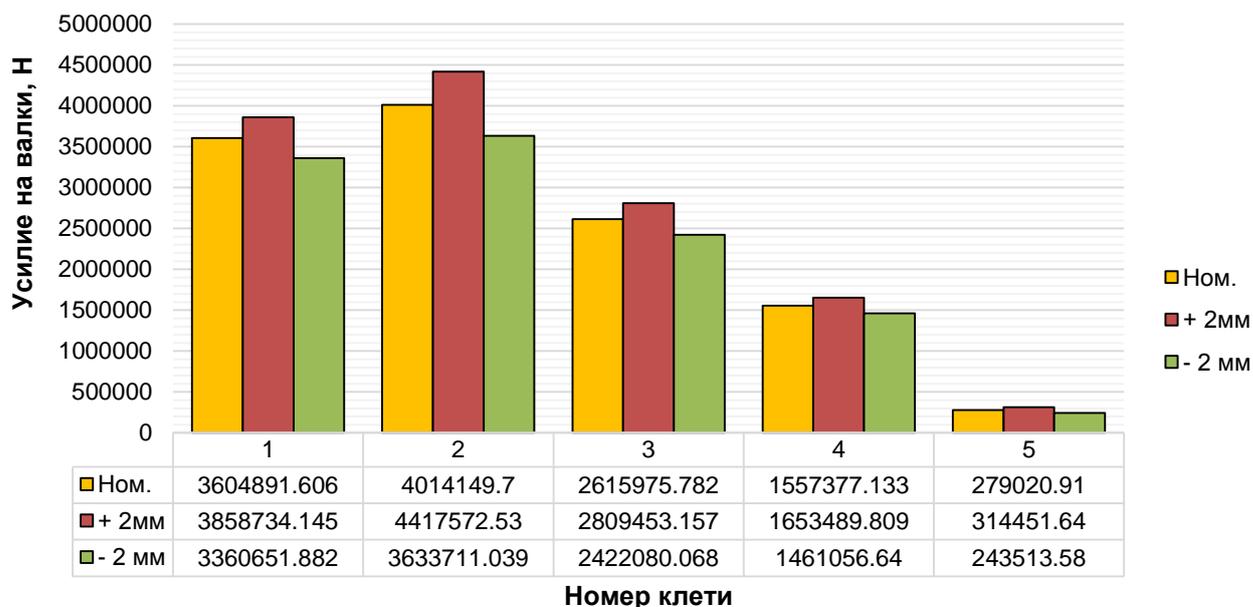


Рисунок 36 – Распределение усилий на валки при изменении толщины стенки гильзы

Изменение толщины стенки гильзы оказывает существенное влияние на усилие прокатки в клетях №№ 1-3, максимальное изменение наблюдается в клетях №2 (-9,48 / +10,1 %). При анализе распределения натяжения по клетям стана (рисунок 37) максимальное изменение наблюдается в межклетевом промежутке 2-3 ($\pm 23,0$ %).

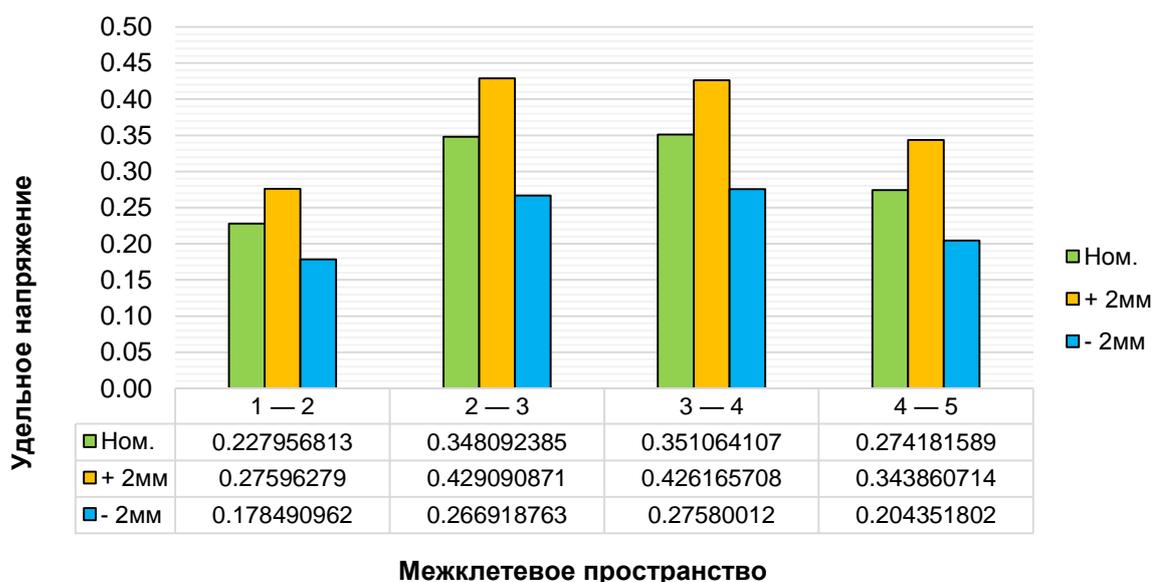


Рисунок 37 – Распределение натяжения в межклетевых промежутках при изменении толщины стенки гильзы

Анализ влияния изменения наружного диаметра гильзы.

Распределение усилий и натяжения по клетям стана при изменении наружного диаметра гильзы представлено на рисунках 38, 39.

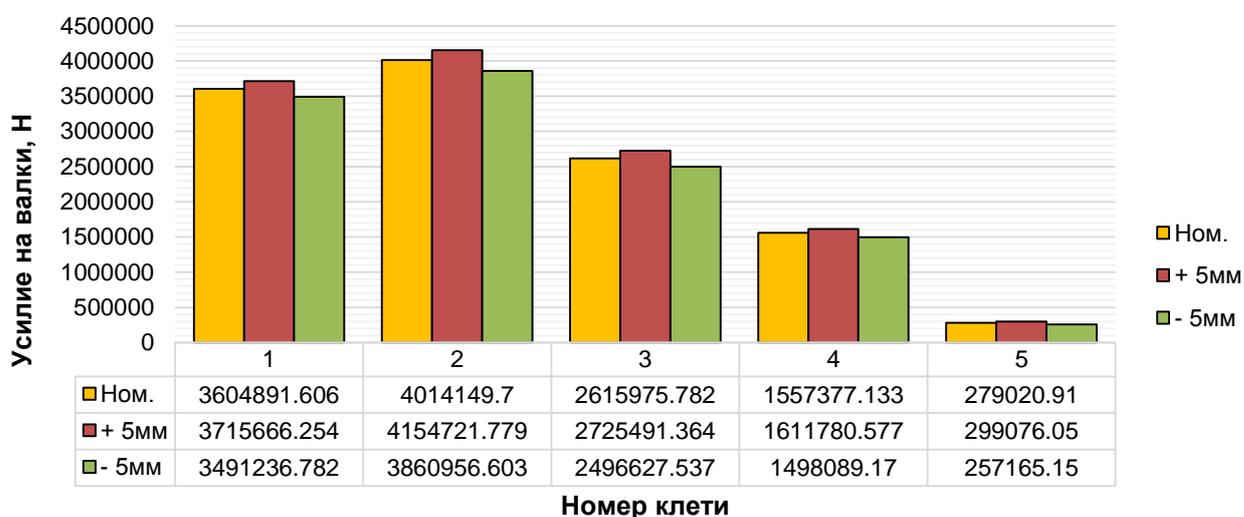


Рисунок 38 – Распределение усилий на валки при изменении наружного диаметра гильзы

Изменение наружного диаметра гильзы при пересчете в абсолютных величинах оказывает значительное меньшее влияние на усилие прокатки, чем толщина стенки, тем не менее динамика остаётся аналогичной (клетки №№ 1-3), при этом максимальное изменение наблюдается также в клетке №2 (-3,8 / +3,5 %). Однако при анализе натяжения (рисунок 39) максимальная разница (-15,4 / +14,1 %) достигается в межклетевом промежутке 1-2.

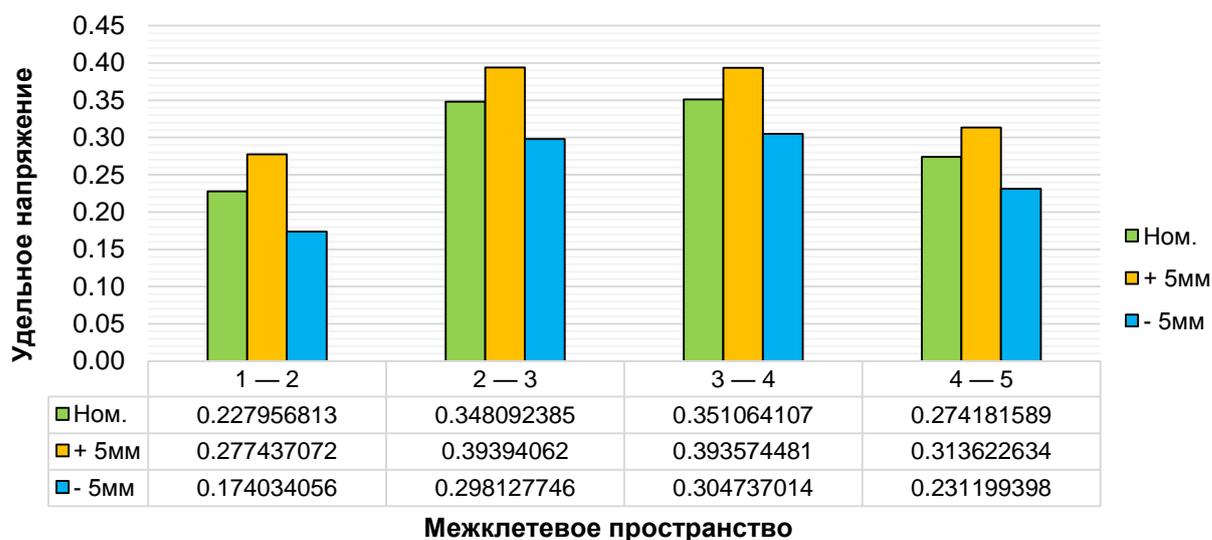


Рисунок 39 – Распределение натяжения в межклетевых промежутках при изменении наружного диаметра гильзы

Анализ изменения температуры гильзы.

Распределение усилий и натяжения по клетям стана при изменении температуры гильзы представлено на рисунках 40, 41.

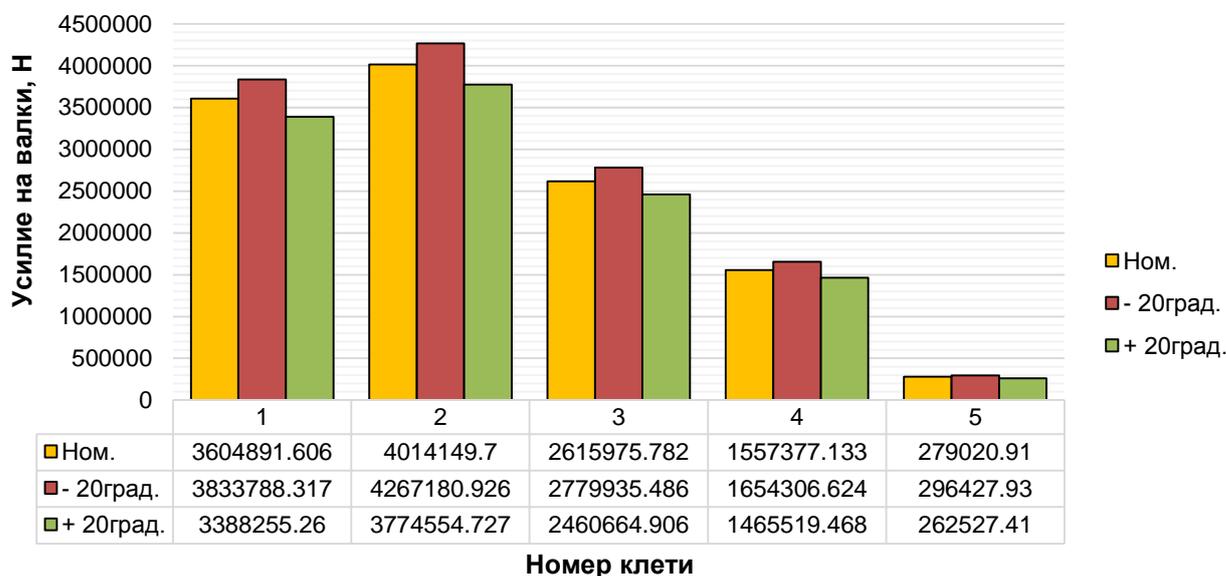


Рисунок 40 – Распределение усилий на валки при изменении температуры гильзы

Изменение температуры гильзы оказывает влияние на усилие прокатки в клетях №№ 1-4. Максимальное изменение достигает $\pm 6,0\%$. При этом изменение температуры в данном диапазоне не оказывает влияние на распределение натяжения в межклетевых промежутках (рисунок 41).

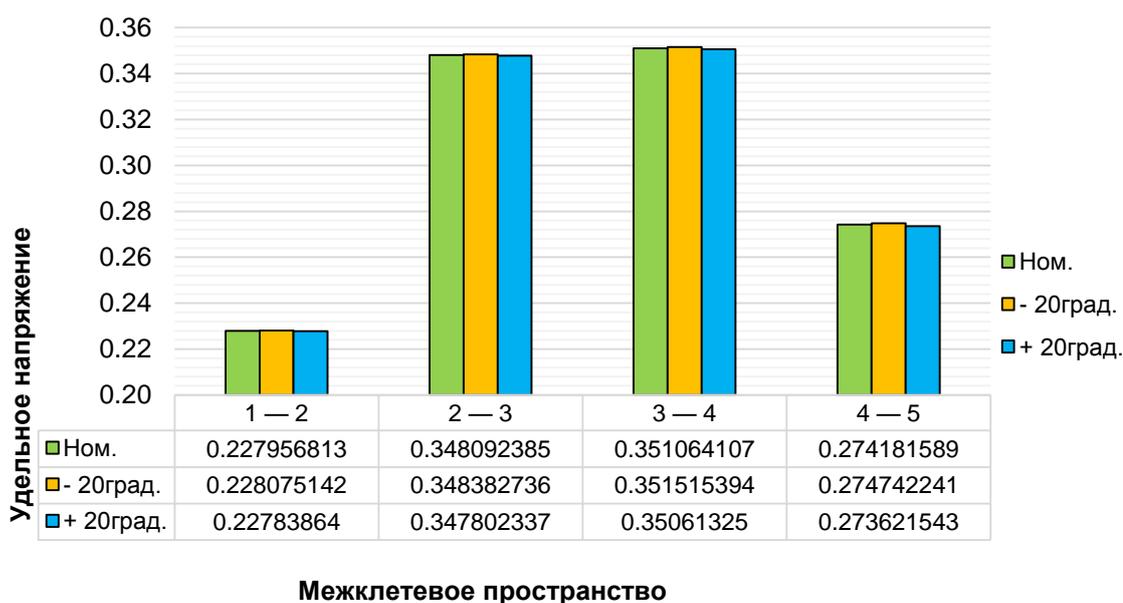


Рисунок 41 – Распределение натяжения в межклетевых промежутках при изменении температуры гильзы

Анализ изменения коэффициента трения в системе гильза-валок.

Распределение усилий и натяжения по клетям стана при изменении коэффициента трения представлено на рисунках 42, 43.

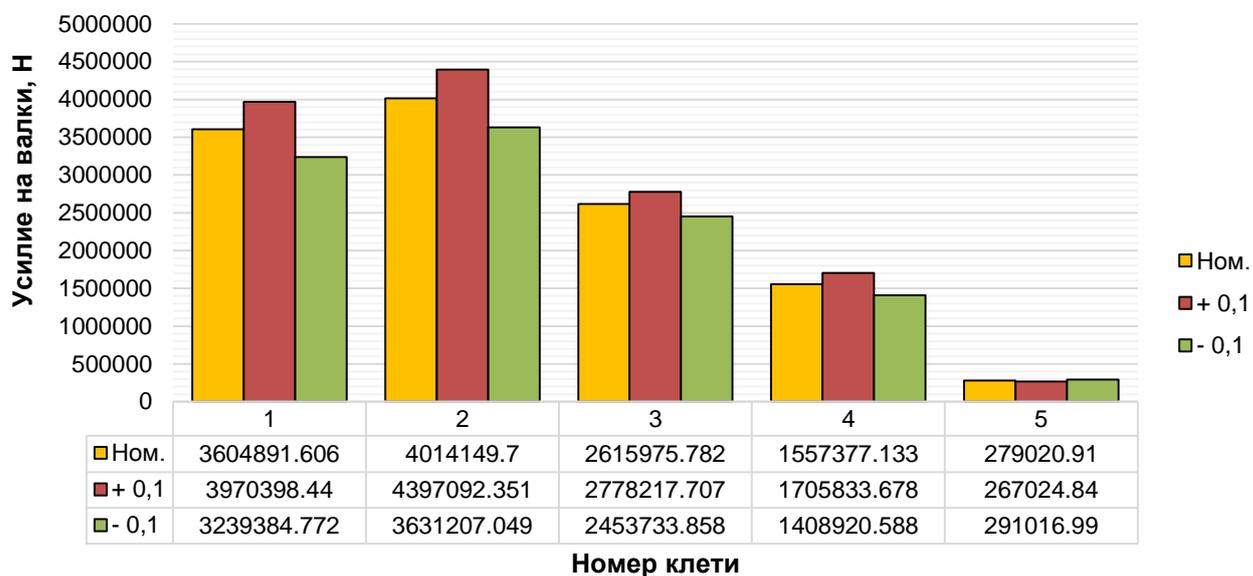


Рисунок 42 – Распределение усилий на валки при изменении коэффициента трения

Изменение коэффициента трения в данном диапазоне оказывает значительное влияние как на усилие прокатки в клетях №№ 1-2 ($\pm 9,5\%$), так и изменение натяжения в межклетевых промежутках 3-4 и 4-5 от $\pm 19,0$ до $\pm 24,0\%$ (рисунок 43).

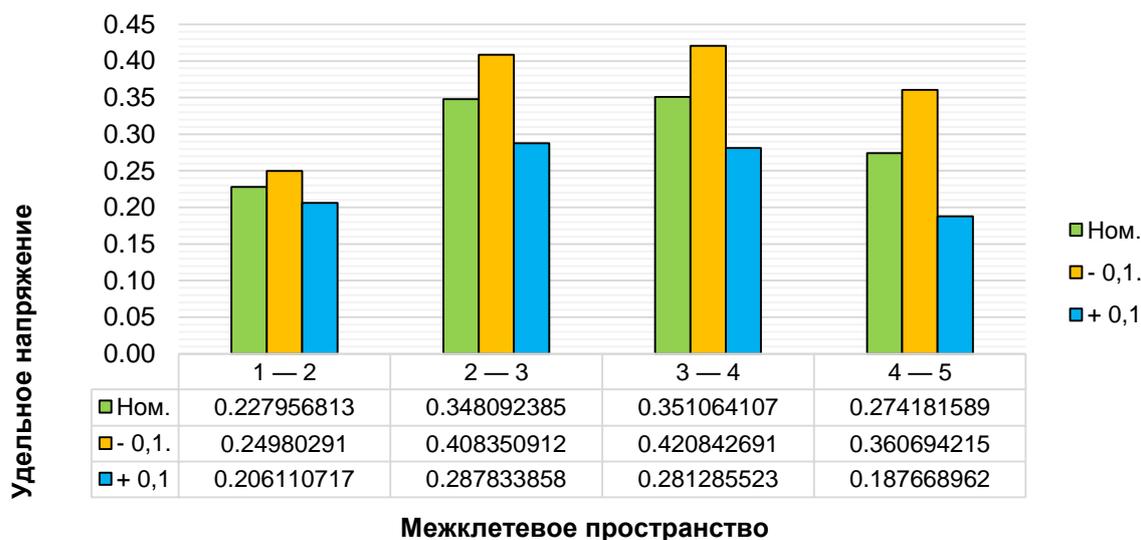


Рисунок 43 – Распределение натяжения в межклетевых промежутках при изменении коэффициента трения

Анализ изменения скорости оправки стана.

Распределение усилий и натяжения по клетям стана при изменении скорости оправки представлено на рисунках 44, 45.

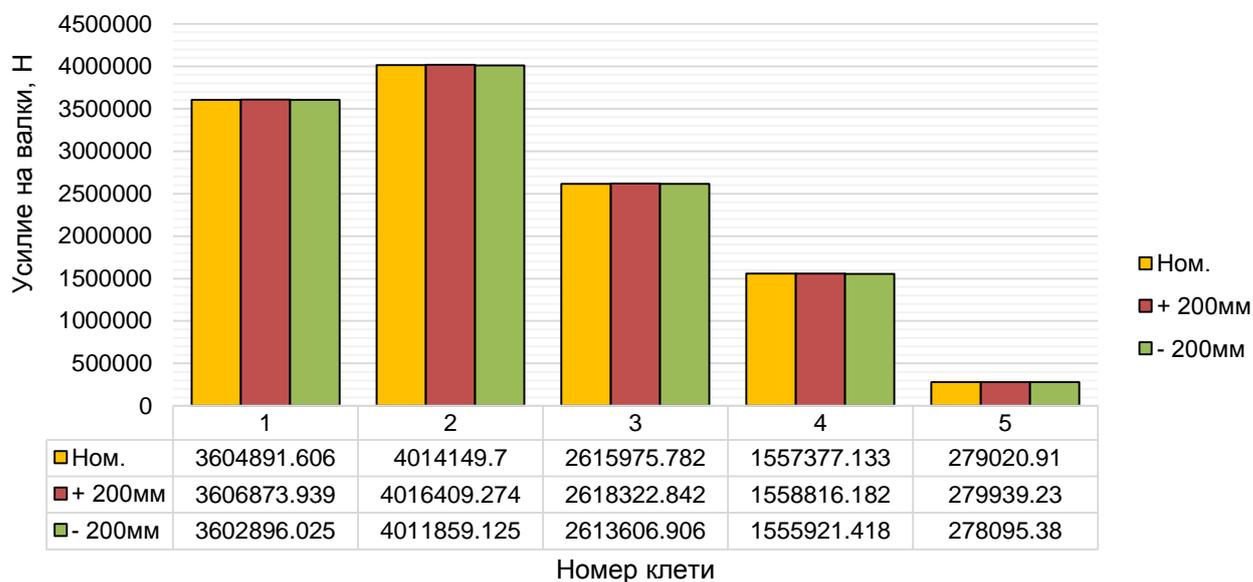


Рисунок 44 – Распределение усилий на валки при изменении скорости оправки

Изменение скорости оправки непрерывного стана в данном диапазоне не оказывает влияния как на усилие прокатки (рисунок 45), так и натяжение, что также хорошо коррелируется с результатами компьютерного моделирования, приведенными в п. 3.2.

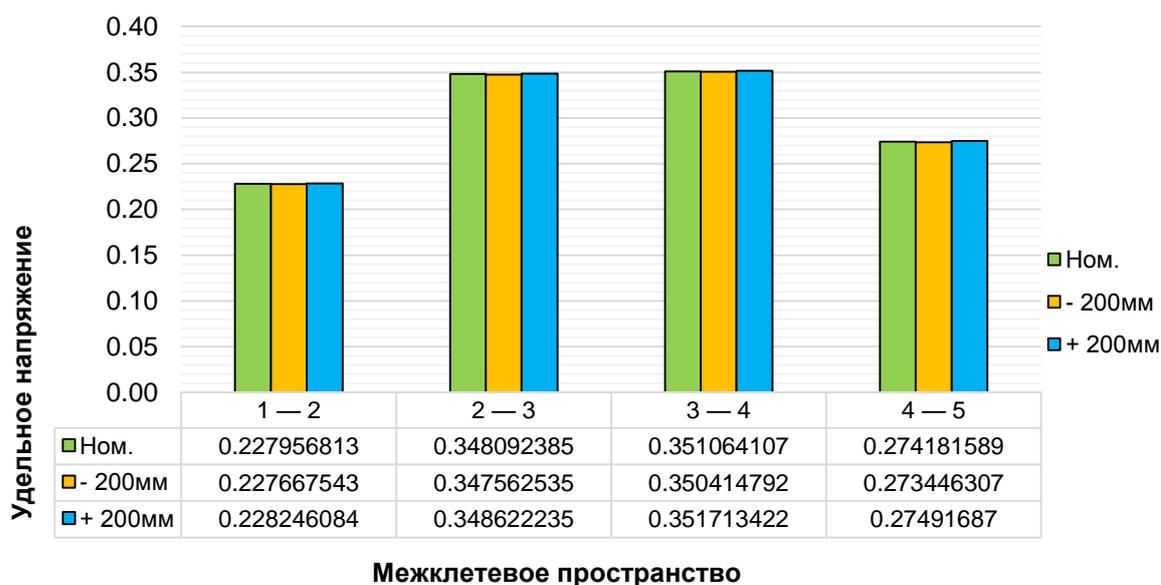


Рисунок 45 – Распределение натяжения в межклетевых промежутках при изменении скорости оправки

Анализ изменения частоты вращения валков.

Распределение усилий и натяжения по клетям стана при изменении частоты вращения валков представлено на рисунках 46, 47.

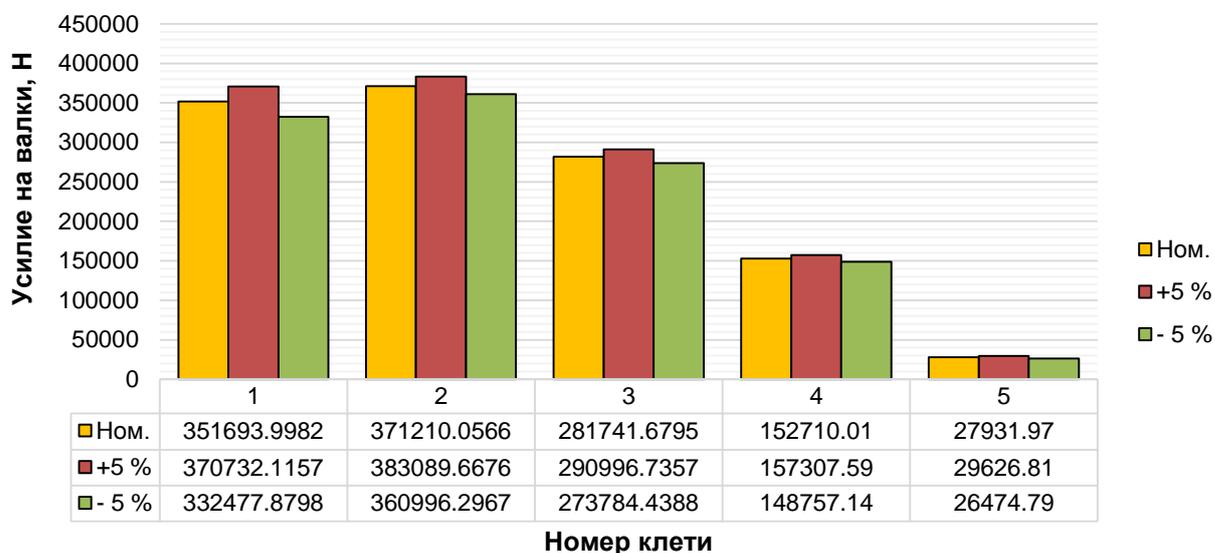


Рисунок 46 – Распределение усилий на валки при изменении частоты вращения валков в первой клетке стана

Изменение частоты вращения валков способствует изменению усилия на валки по клетям стана в диапазоне от $\pm 2,0$ до $\pm 6,0$ % и межклетевого натяжения от $\pm 8,0$ до $\pm 11,0$ % (рисунок 47).

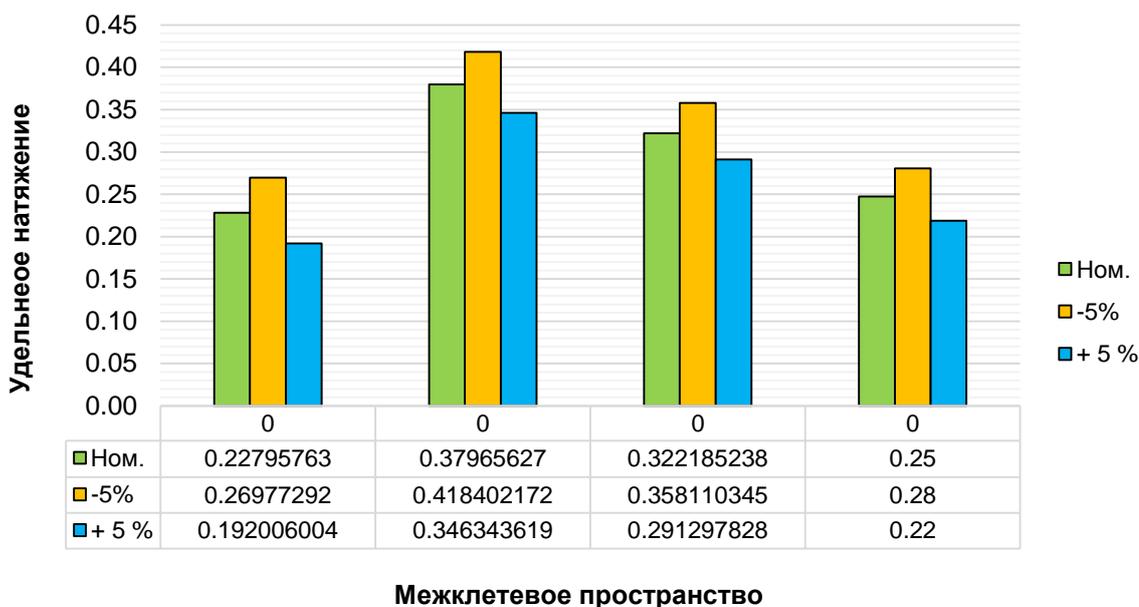


Рисунок 47 – Распределение натяжения в межклетевых промежутках при изменении частоты вращения валков

В ходе проведенного параметрического анализа было установлено следующее:

- наибольшее влияние на усилие прокатки и межклетевое натяжение оказывает изменение толщины стенки и наружного гильзы, то есть степени деформации. А также коэффициента трения и частоты вращения валков;

- изменение скорости перемещения оправки и температуры раската в исследуемых диапазонах не оказывают существенного влияния на усилие и межклетевое натяжение.

С учетом того, что в процессе производства толщина стенки, наружный диаметр гильзы, а также коэффициент трения могут варьироваться в пределах одной прокатной кампании (в частности в зависимости от износа прокатного инструмента) тем самым оказывая влияние на энергосиловые параметры процесса, целесообразно изменять настройку стана за счет варьирования позиций гидравлических капсул (сведение или разведение) и частоты вращения валков относительно номинальной величины, способствующих выравниванию диаграмм распределения усилия при прокатке труб заданного сортамента. В связи с этим необходимо выявить закономерности влияния данных факторов на изменение усилия прокатки и натяжения между клетями при прокатке труб различного сортамента и, тем самым, разработать методологические основы настройки непрерывного раскатного стана.

4.3. Методологические основы настройки непрерывного раскатного стана

Для анализа и разработки методологических основ настройки непрерывного стана принятые режимы и технологические параметры процесса соответствовали технологии раскатки гильз наружным диаметром 433 мм с толщиной стенки 26,9 мм ($D/S=16,1$), реализуемой с использованием СК 384 мм стана FQM. При раскатки гильз заданного сортамента получают черновые трубы наружным диаметром 384 мм с толщиной стенки 8,0 мм ($D/S=48$). Данный сортament труб является один из наиболее сложных как с точки

зрения условий деформирования, так и определения настроечных параметров, способствующих рациональному распределению усилий по клетям стана.

Диапазон изменения толщины стенки в вершине калибра в зависимости от положения валков представлен в таблице 17.

Таблица 17 – Диапазон изменения толщины стенки по клетям стана

Валки	Клеть №1	Клеть №2	Клеть №3	Клеть №4	Клеть №5
	±2,0 мм			±0,5 мм	
Разведены	16,7	15,7	10,7	8,6	8,6
Номинальное положение	14,7	13,7	8,7	8,1	8,1
Сведены	12,7	11,7	6,7	7,6	7,6

При пересчете энергосиловых параметров с использованием новой автоматизированной методики расчета коэффициент вытяжки определялся на основе графоаналитического метода (рисунок 48), реализованного в приложении Компас-2D [95].

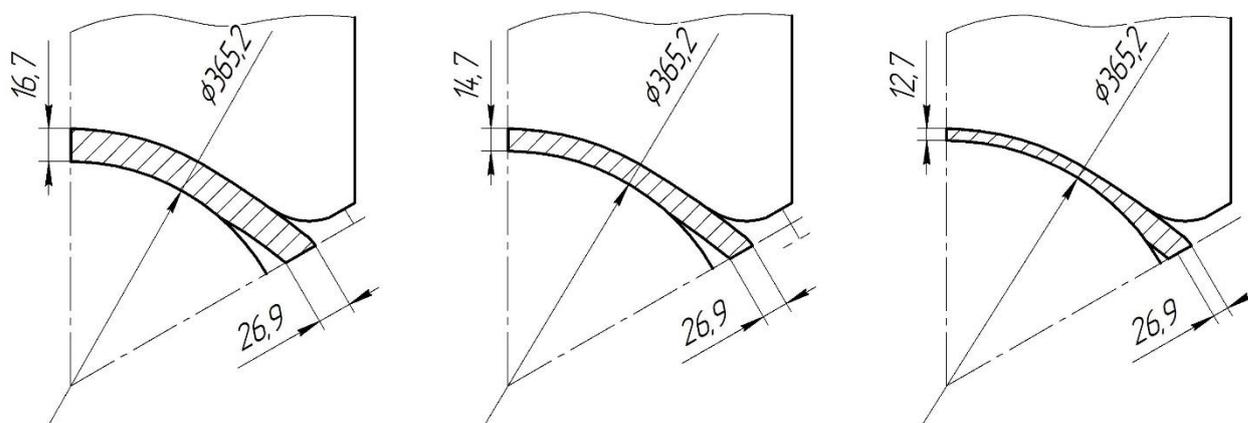


Рисунок 48 – Изменение профиля поперечного сечения раската в клетях №1 при: а – разведении валков; б – номинальном позиционировании валков; в – сведении валков

При изменении позиции валков стана регистрировались следующие технологические параметры: уширение раската, угол охвата оправки и усилие на валки. Результаты анализа для черновой и чистовой групп клетей стана представлены в таблицах 18-22.

Таблица 18 – Изменение позиционирования валков в клети №1

Параметры	Позиционирование валков		
	Разведены	Номинал	Сведены
Уширение, отн. ед.	-0,0154709	-0,0330128	-0,051127
Угол охвата, отн. ед.	0,75713201	0,82769367	0,9014669
Усилие на валки, Н	2763533,1	3604891,61	4759917,6

Таблица 19 – Изменение позиционирования валков в клети №2

Параметры	Позиционирование валков		
	Разведены	Номинал	Сведены
Уширение, отн. ед.	0,00363877	-0,0174444	-0,036566
Угол охвата, отн. ед.	0,67846546	0,76509709	0,8420219
Усилие на валки, Н	3102465,49	3835071,21	4768919,5

Таблица 20 – Изменение позиционирования валков в клети №3

Параметры	Позиционирование валков		
	Разведены	Номинал	Сведены
Уширение, отн. ед.	0,02351546	0,00056495	-0,020249
Угол охвата, отн. ед.	0,59006887	0,69139162	0,7763917
Усилие на валки, Н	2567974,5	3167900,4	3586411,7

Таблица 21 – Изменение позиционирования валков в клети №4

Параметры	Позиционирование валков		
	Разведены	Номинал	Сведены
Уширение, отн. ед.	0,03766046	0,02763506	0,0179952
Угол охвата, отн. ед.	0,51818782	0,57019752	0,615689
Усилие на валки, Н	1290815,73	1524042,85	1627937,5

Таблица 22 – Изменение позиционирования валков в клети №5

Параметры	Позиционирование валков		
	Разведены	Номинал	Сведены
Уширение, отн. ед.	0,06581553	0,06437864	0,0533256
Угол охвата, отн. ед.	0,29562073	0,31452911	0,4187016
Усилие на валки, Н	53057,4347	263057,435	473057,43

В ходе анализа полученных результатов установлено:

- деформация раската в черновой группе клетей в отличие от чистовой осуществляется преимущественно с отрицательным уширением, что является следствием повышенного течения металла в продольном направлении. Максимальное уширение зафиксировано в 5 клетки стана. Это в свою очередь обусловлено необходимостью создания требуемого угла охвата оправки с целью беспрепятственного извлечения раската с оправки (рисунок 49);

- угол охвата оправки по клетям стана имеет ниспадающую величину. Причем величина сведения валков оказывает численно большее влияние на изменение угла охвата относительно номинального значения (рисунок 50);

- сведение валков в черновой группе клетей оказывает значительное влияние на изменение усилия прокатки (рисунок 51). Минимальное изменение усилия в чистовой группе клетей обусловлено недостаточным заполнением очага деформации металлом.

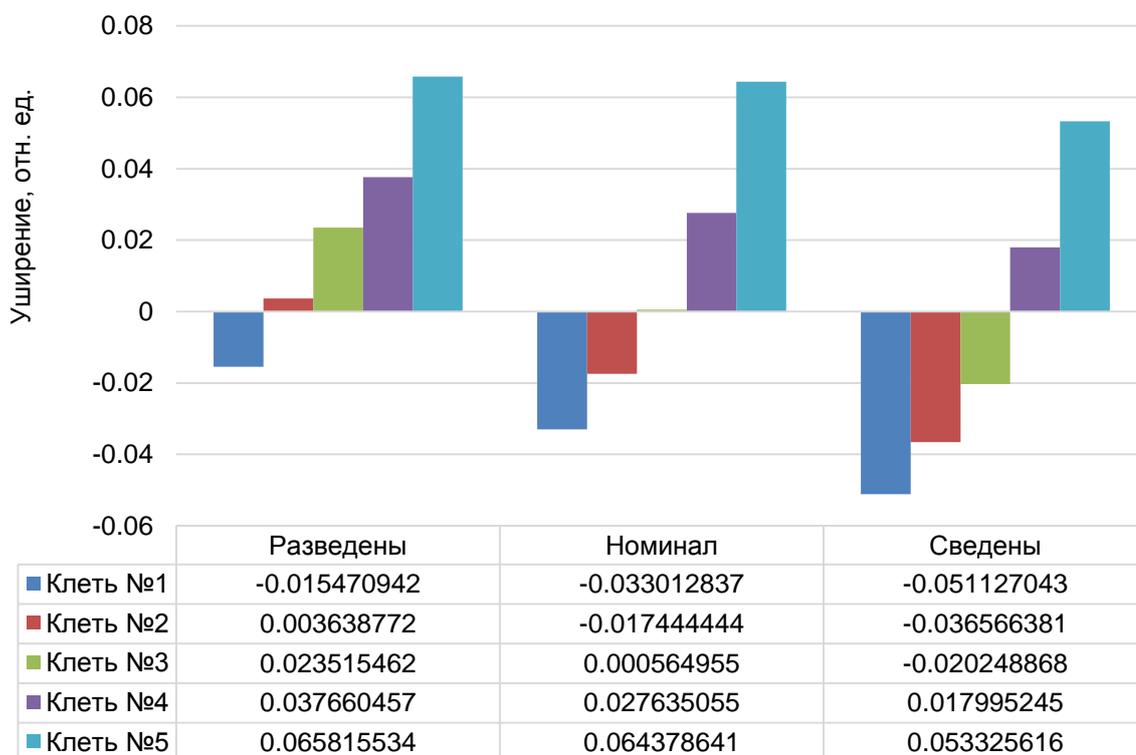


Рисунок 49 – Изменение уширения раската по клетям стана

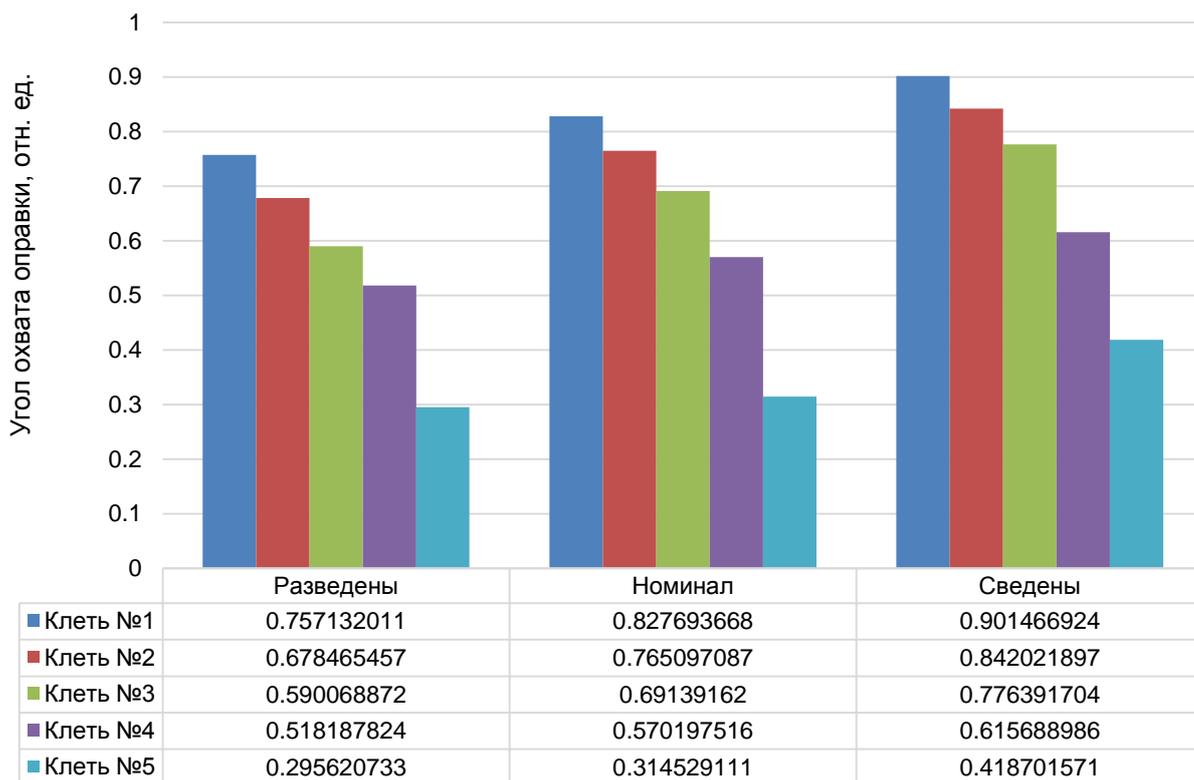


Рисунок 50 – Изменение угла охвата оправки по клетям стана

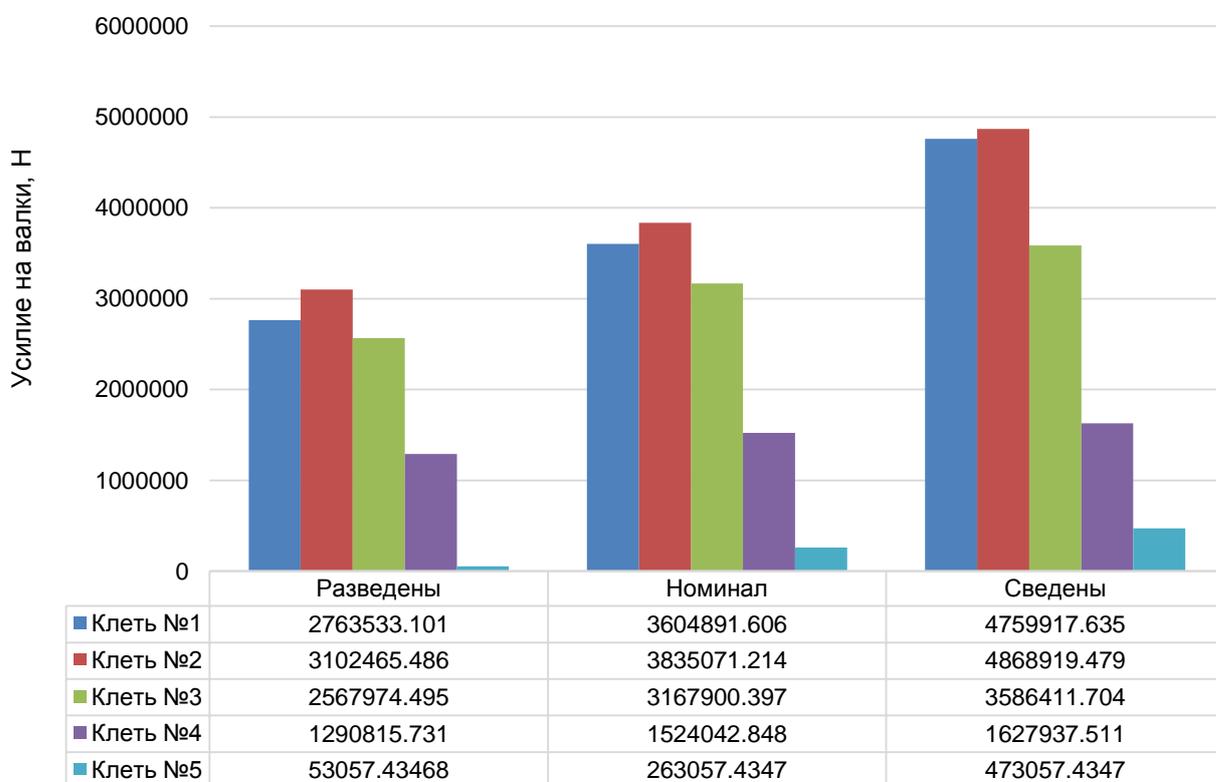


Рисунок 51 – Изменение усилия, действующего на валки по клетям стана

Для систематизации полученных результатов изменение толщины стенки целесообразно выразить через относительный показатель:

$$\varepsilon = \frac{S_{i-1} - S_i}{S_{i-1}} = 1 - \frac{S_i}{S_{i-1}} \quad (52)$$

Тогда, в соответствии с рисунком 52, усилие прокатки может быть описано выражением:

$$P_{ex} = a_p \cdot \left[1 - \frac{S_i}{S_{i-1}} \right] - b_p \quad (53)$$

где a_p и b_p – коэффициенты уравнения линейной регрессии, численно равные 7,86 и 0,324 МН соответственно.

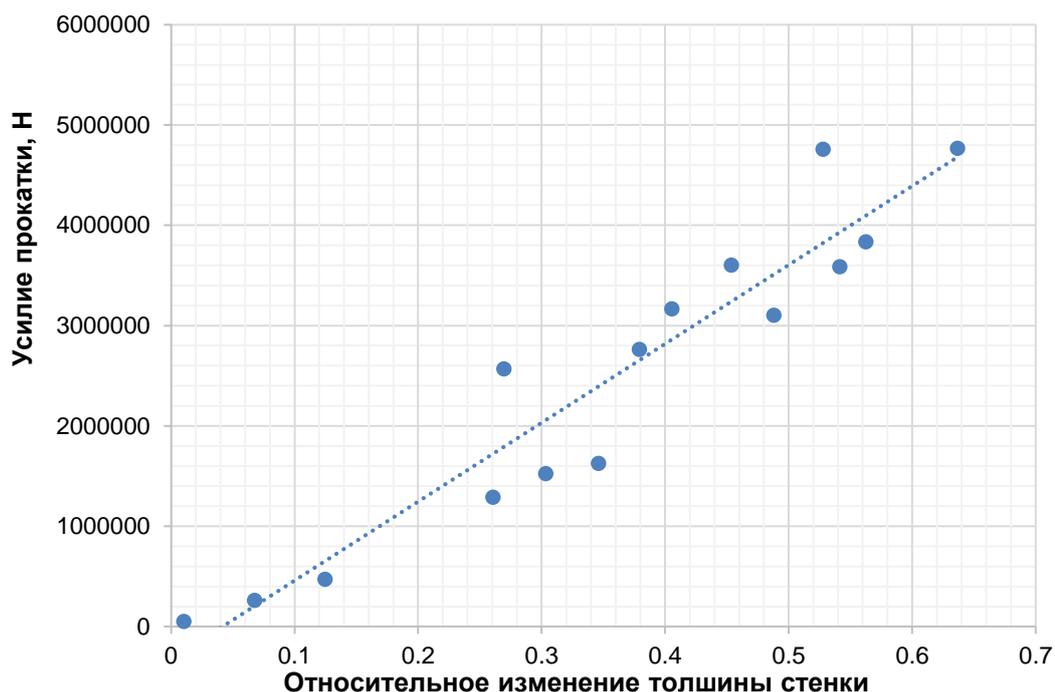


Рисунок 52 – Усилие прокатки в зависимости от позиционирования валков

Для решения обратной задачи, когда при известном усилии прокатки (например, по данным *FDA-offline*) необходимо определить рациональное позиционирование валков, воспользуемся следующей зависимостью:

$$S_i = \frac{S_{i-1} \cdot (a_p - b_p - P_{ex})}{a_p} \quad (54)$$

В соответствии с рисунком 53, уширение раската может описано выражением:

$$\Delta B = -a_B \cdot \left[1 - \frac{S_i}{S_{i-1}} \right] + b_B \quad (55)$$

где a_B и b_B – коэффициенты уравнения линейной регрессии, численно равные -0,1847 и 0,0743 соответственно.

Для решения обратной задачи воспользуемся зависимостью:

$$S_i = \frac{S_{i-1} \cdot (a_B - b_B - \Delta B)}{a_B} \quad (56)$$

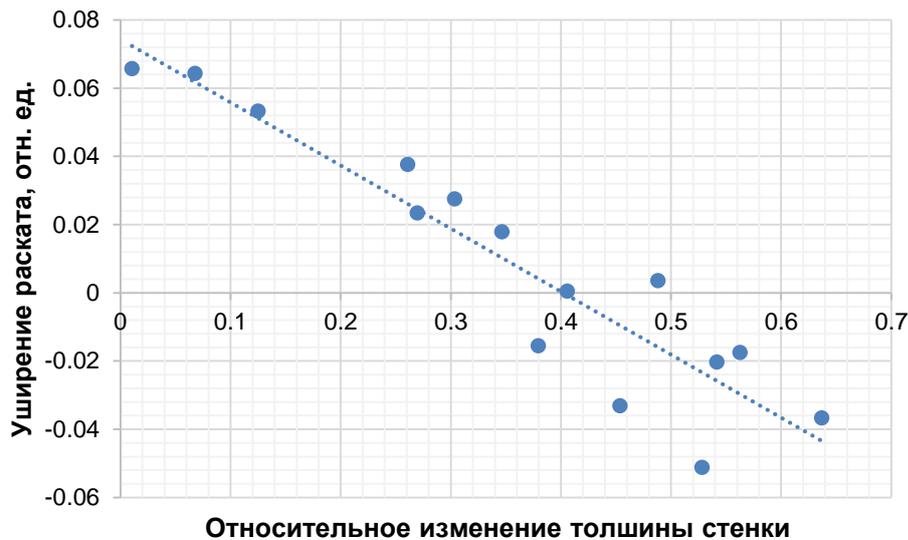


Рисунок 53 – Уширение раската в зависимости от позиционирования валков

В соответствии с рисунком 54, угол охвата оправки через заданное изменение позиционирования валков стана может быть описан выражением:

$$\alpha_s = a_\alpha \cdot \left[1 - \frac{S_i}{S_{i-1}} \right] + b_\alpha \quad (57)$$

где a_B и b_B – коэффициенты уравнения линейной регрессии, численно равные 0,9482 и 0,2976 соответственно.

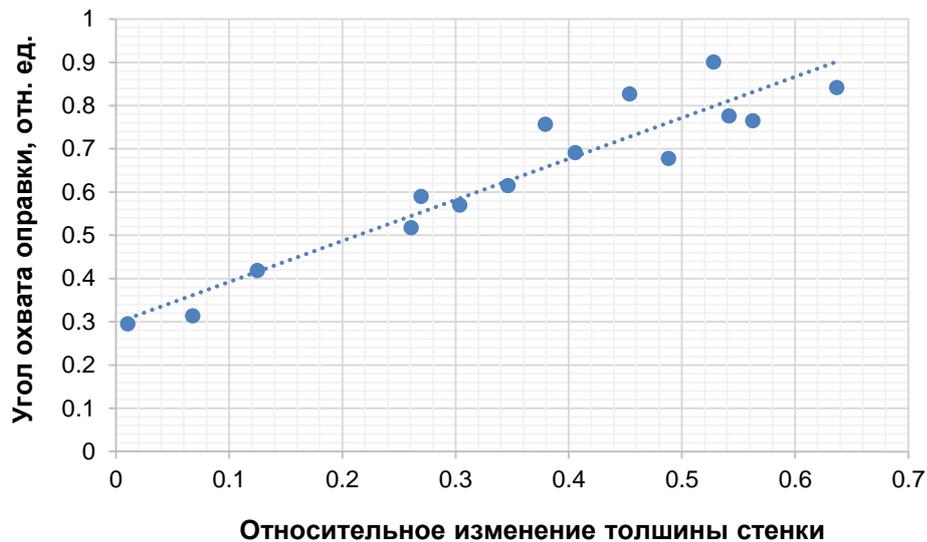


Рисунок 53 – Угол охвата оправки в зависимости от позиционирования валков

Для решения обратной задачи воспользуемся выражением:

$$S_i = \frac{S_{i-1} \cdot (a_\alpha - b_\alpha - \alpha_s)}{a_\alpha} \quad (58)$$

Далее на основе разработанной автоматизированной методики проведен анализ влияния частоты вращения валков на усилие прокатки и величину натяжения для наиболее нагруженных клеток (№№ 1-3). Варьирование частоты вращения валков осуществлялось в диапазоне $\pm 5,0\%$ от номинального значения (таблица 23). Изменение величин усилия прокатки и натяжения представлено на рисунках 54 и 55 соответственно.

Таблица 23 – Варьирование частоты вращения валков, об/сек

Частота вращения валков	Клеть №1	Клеть №2	Клеть №3
- 5,0 %	0,528845	0,762998	1,027182
Номинал	0,555287	0,801148	1,078541
+ 5,0 %	0,583051	0,841206	1,132468

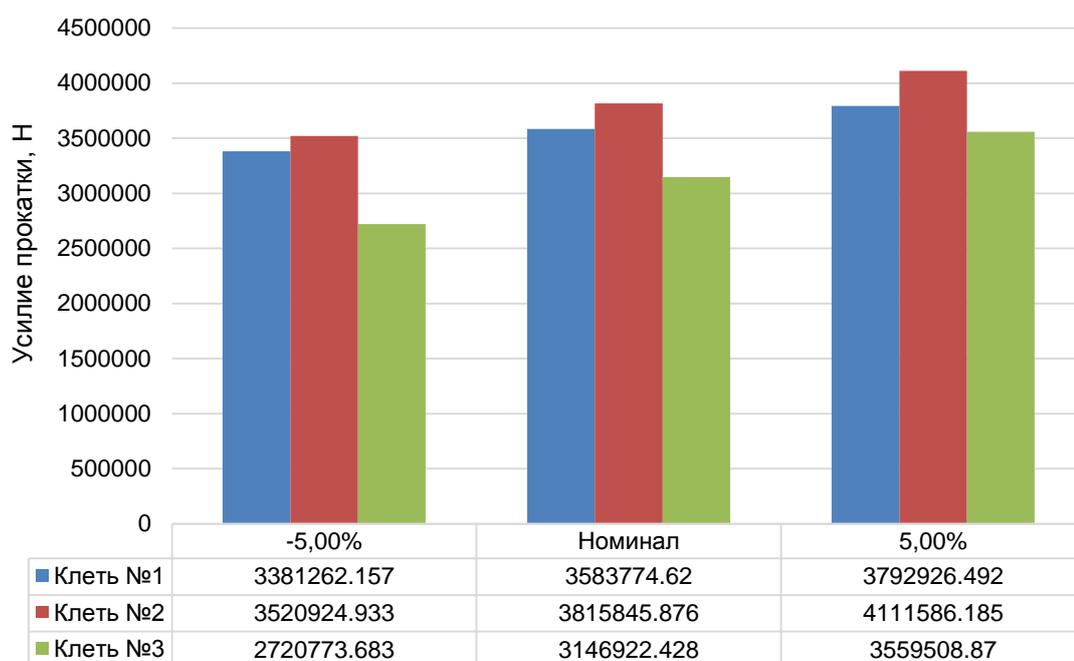


Рисунок 54 – Изменение усилия прокатки при варьировании частоты вращения валков

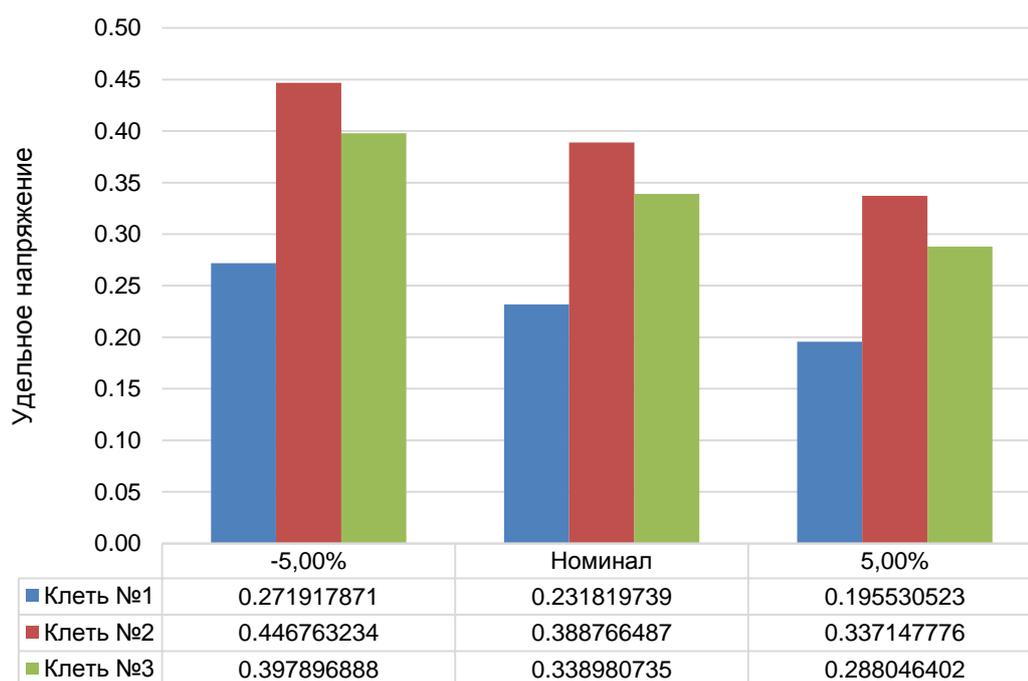


Рисунок 55 – Изменение натяжения при варьировании частоты вращения валков

При анализе полученных результатов установлено, что усилие прокатки в исследуемой клетке увеличивается с ростом частоты вращения валков, а величина натяжения снижается. С учетом того, что в каждой последующей

клетки изменяется и параметр (52), структурирование данных целесообразно выполнить с учетом относительно показателя:

$$k_n = \frac{n_k}{\varepsilon}, \quad (59)$$

где n_k – коэффициент натяжения в исследуемой клетке.

Тогда, результаты, приведенные на рисунках 54 и 55, численно могут быть описаны выражением:

$$P_{ex} = a_n \cdot k_n - b_n, \quad (60)$$

где a_n и b_n – коэффициенты уравнения линейной регрессии, численно равные 1,76 и 4,72 МН соответственно.

Приравняв правые части уравнения (53) и (60) получаем (рисунок 56):

$$k_n = \frac{a_p \cdot \varepsilon - b_p + b_n}{a_n}. \quad (61)$$

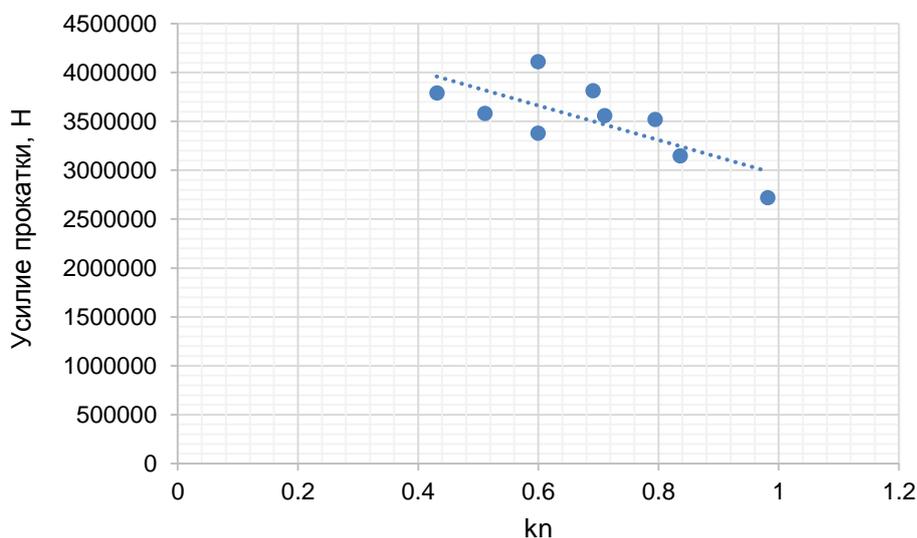


Рисунок 56 – Изменение усилия прокатки в зависимости от частоты вращения валков и толщины стенки раската

Наличие подпора или натяжения даже при их сравнительно небольших величинах вносит значительное изменение в процесс прокатки. Установлено,

что при переднем или заднем натяжении изменяется средний диаметр трубы, выходящей из валков. Это изменение связано с большим или меньшим уширением металла и заполнением калибра. Если рассматривать две смежные клетки, работающие с натяжением или подпором, то влияние этого фактора в основном распространяется на последующую клетку. Ошибка в определении режима натяжений может привести к возникновению аварийной ситуации. Превышение допустимых значений растягивающих продольных усилий приводит к появлению разрывов на трубе (рисунок 57а), превышение допустимых сжимающих продольных усилий приводит к смятию трубы между клетями (рисунок 57б)



а



б

Рисунок 57 – Дефекты, вызванные превышением продольных усилий допустимых значений

Таким образом, появление вышеупомянутых дефектов зависит от следующих факторов:

- повышенные величины обжатия толщины стенки (коэффициент вытяжки) в процессе деформации, неправильная настройка режимов деформации по клетям стана;
- несоблюдение скоростного режима прокатки. Возникновение подпирющих / растягивающих усилий со стороны металла при прокатке в клетки;
- несоответствующие размеры калибровки валков или применение новых форм калибров отличных от классических (рисунок 58).

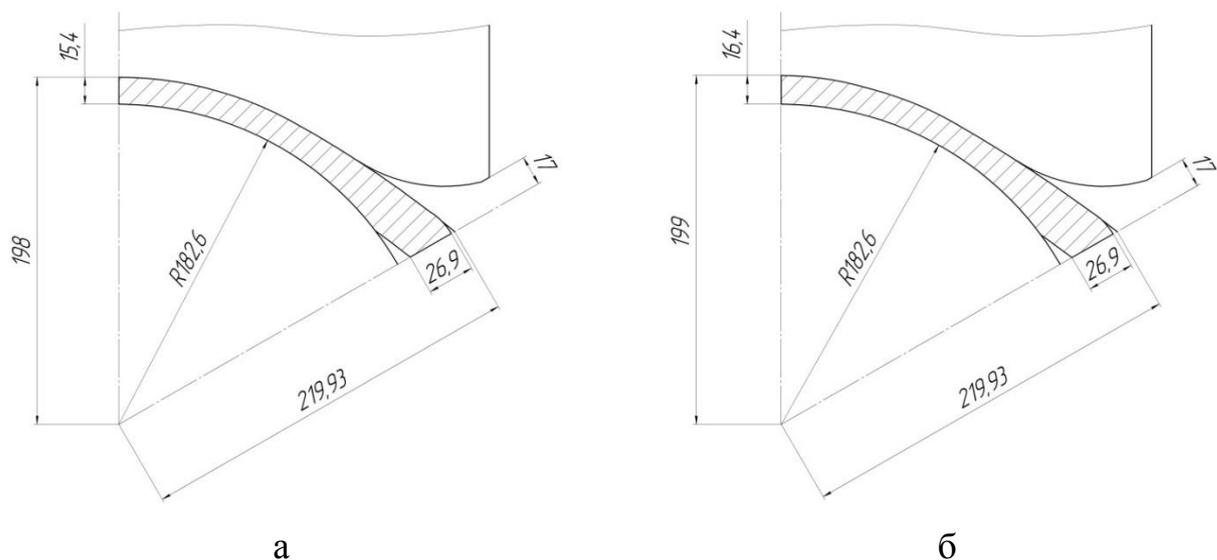


Рисунок 58 – Поперечное сечение очага деформации в первой клетке стана при использовании калибра: а – классического вида; б – новой формы

Для исключения возникновения вышеупомянутых аварийных ситуаций далее на основе имеющейся фактической информации (таблица 24) проведен анализ изменения величины продольных усилий с целью определения рациональных режимов и настроечных параметров процесса прокатки (в частности настройки частоты вращения валков первой клетки непрерывного стана).

Таблица 24 – Настроечные параметры процесса прокатки

Параметр	Клеть 1	Клеть 2	Клеть 3	Клеть 4	Клеть 5
Размер калибра, мм	396,46	391,7	386,33	384,53	384,53
Эксцентриситет калибра, мм	0,23	0,25	0,56	0,26	0,26
Коэффициент вытяжки	1,472	1,372	1,256	1,160	1,041
Межвалковый зазор, мм	34,4	32,4	29,0	24,5	24,5
Толщина стенки, мм	16,98	13,45	10,61	9,45	9,45

Номинальный диаметр валков, мм	965,0	960,0	985,0	780,0	765,0
Скорость трубы на выходе из клетки, мм/сек	1322,1	1814,5	2279,0	2642,8	2750,0
Частота вращения валков, об/мин	40,67	56,35	67,08	118,09	131,69
Температура раската, °С	1112,0	1083,8	1066,1	1048,4	1038,1

По результатам моделирования процесса прокатки в разработанном программном продукте установлено следующее:

- в межклетевых промежутках отмечаются растягивающие напряжения, которые, в свою очередь, приводят к повышенному углу охвата оправки. В результате этого увеличивается риск образования поперечных разрывов на трубах (рисунок 57а), а чрезмерное увеличение угла охвата оправки приводит к остановке и смятию раската в межклетевых промежутках (рисунок 57б). В связи с этим процесс прокатки целесообразно осуществлять при большей частоте вращения валков в первой клетке стана (макс. 10% от номинальной величины, рисунок 59);

- увеличение частоты вращения валков до 10% в первой клетке стана способствует снижению удельного напряжения в межклетевых промежутках: 1-2 – до 29 %; 2-3, 3-4 и 4-5 – до 20%;

- дальнейшее увеличение частоты вращения валков в первой клетке стана может оказывать негативное влияние на захват металла валками. В связи с этим целесообразно осуществлять корректировку скорости задачи гильзы (частоты вращения задающего ролика) в непрерывный стан;

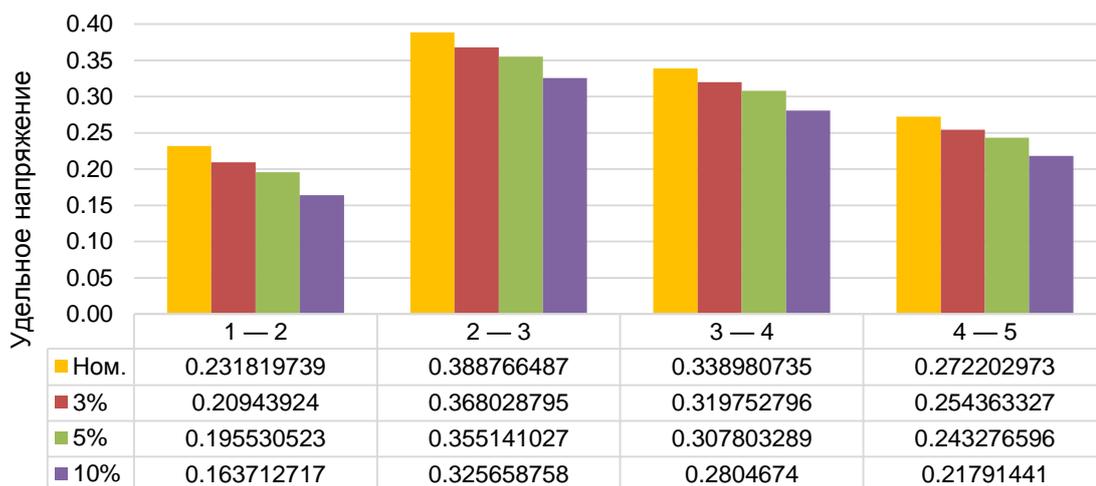


Рисунок 59 – Изменение натяжения в зависимости от частоты вращения валков

- при изменении частоты вращения валков в первой клетке стана скорость оправки целесообразно также изменить на аналогичную величину с целью исключения влияния дополнительных сил трения, возникающих на контакте внутренней поверхности трубы и оправки и оказывающих отрицательное воздействие на процесс прокатки.

Выводы по главе 4

1. На основе разработанной автоматизированной методики расчета технологических параметров процесса непрерывной раскатки гильз выполнен параметрический анализ.
2. Изменение настройки стана целесообразно осуществлять за счет варьирования позиций гидравлических капсул (сведение или разведение) и частоты вращения валков относительно номинальной величины, способствующих выравниванию диаграмм распределения усилия при прокатке труб заданного сортамента.
3. Выявлены новые математические зависимости, позволяющие осуществлять оперативный контроль и регламентировать основные параметры процесса непрерывной раскатки гильз.
4. скорректированы скоростные режимы непрерывного стана, позволяющие снизить риск возникновения аварийных ситуаций.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате выполненной диссертационной работы получены следующие результаты:

1. На основе энергостатического метода и эмпирических зависимостей разработан алгоритм и методика расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз в многоклетевом раскатном стане, позволяющая с высокой степенью точности определять усилие прокатки в чистовых клетях и с погрешностью менее 1% определять усилие прокатки в черновых клетях стана.

2. Разработаны математические модели для расчета угла охвата оправки и уширения раската уточняющие расчет площади на контактной поверхности между трубой и оправкой.

3. Впервые выявлены зависимости, описывающие влияние скорости перемещения оправки на параметры технологического процесса непрерывной раскатки гильз.

4. Разработаны методологические основы настройки непрерывного раскатного стана. Выявлены новые математические зависимости, позволяющие осуществлять оперативный контроль и регламентировать основные параметры процесса непрерывной раскатки гильз.

5. Регламентированы мероприятия по изменению настройки непрерывного стана за счет варьирования позиций гидравлических капсул и частоты вращения валков, способствующих выравниванию диаграмм распределения усилия при прокатке труб заданного сортамента.

Результаты теоретических исследований, физического и компьютерного моделирования способствуют дальнейшему совершенствованию технологии продольной прокатки труб в линии ТПА с непрерывным раскатным станом за счет разработанной автоматизированной методики расчета энергосиловых параметров процесса прокатки и новых технических решений, полученных на её основе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов Ф.А, Горячая прокатка и прессование труб /Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – М.: Металлургия, 1972. – 576 с.
2. Шиндлер, К. Производство труб на пилигримовом стане / К. Шиндлер // Производство труб: материалы конференции, проведённой Обществом немецких металлургов совместно с Домом техники г. Эссене. – М.: Металлургия, 1980. – С. 56–64.
3. Потапов, И.Н. Теория трубного производства / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.М. Друян – М.: Металлургия, 1991. – 424 с.
4. Остряков, В.В. Повышение точности труб на агрегатах с автоматическим станом / В.В. Остряков, Ф.Д. Могилевский, Ю.М. Иосифов // Сталь. – 1979. – №10. – С. 768–788.
5. Чикалов, С.Г. Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки / С.Г. Чикалов – Волгоград: Комитет по печати и информации, 1999, 416 с.
6. Романцев, Б.А. Трубное производство / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2011, 970 с.
7. Зимовец, В. Г. Совершенствование производства стальных труб / В. Г. Зимовец – М.: МИСиС, 1996. – 480 с.
8. Романцев, Б.А. Обработка металлов давлением / Б. А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2008. – 960 с.
9. Гуляев, Г.И. Совершенствование производства горячекатаных труб / Г.И. Гуляев, А.С. Коба, Ю.М. Миронов и др. – Киев: Техника, 1985. – 136 с.
10. Матвеев, Б.Н. Горячая прокатка труб / Б.Н. Матвеев. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 142 с.
11. Осадчий, В.Я. Технология и оборудование трубного производства / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец, А. П. Коликов; под ред. В. Я. Осадчего. – М.: Интернет Инжиниринг, 2007. – 560 с.: ил.

12. Коликов, А.П. Машины и агрегаты трубного производства / А. П. Коликов, В. П. Романенко, С. В. Самусев и др.; под ред. А. П. Коликов. – М.: МИСИС, 1998. – 536 с.
13. Осадчий, В.Я. Технология и оборудование трубного производства: учебник для вузов / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец и др. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
14. Пляцковский, О.А. Производство труб на агрегатах с пилигримовым станом / О.А. Пляцковский, В.И. Девятисильный, В.П. Полищук // Обзорная информация института «Черметинформация», 1976, сер. 8. – Вып. 2. – 21 с.
15. Донец, В.В. Распределение усилий при продольной прокатке труб на короткой оправке в зависимости от формы калибра / В. В. Донец, В. Я. Остренко, И. И. Бродский, Н. В. Кирсанов // Производство труб для нефтяной и газовой промышленности. – М.: Metallurgia, 1981. – С. 13–18.
16. Сериков, С.В. Совершенствование методики расчёта многогранной калибровки валков / С.В. Сериков, Ю. М. Иосифов // Всесоюзная научно-техническая конференция «Совершенствование процессов продольной прокатки труб». – Челябинск, 1980. – С. 126–128.
17. Остряков, В.В. Повышение точности труб на агрегатах с автоматическим станом / В.В. Остряков, Ф.Д. Могилевский, Ю.М. Иосифов // Сталь. – 1979. – №10. – С. 768–788.
18. Иосифов, Ю. М. Влияние формы калибра на характер контактных напряжений и износ инструмента автоматического стана / Ю.М. Иосифов, Л. Л. Ситников, С.В. Сериков // Продольная прокатка труб. – Челябинск, 1980. – С. 104–106.
19. Блинов, Ю.И. Совершенствование профиля калибра автоматического стана / Ю. И. Блинов, С. В. Сериков, Ю. М. Иосифов // Производство труб. – М.: Metallurgia, 1979. – № 5. – С. 8–11.
20. Столетний, М. Ф. Точность труб / М. Ф. Столетний, Е. Д. Клемперт. – М.: Metallurgia, 1975. – 240 с.

21. Гуляев, Ю. Г. Повышение точности и качества труб / Ю. Г. Гуляев, М. З. Володарский, О. И. Лев, С. А. Михеев, Г. П. Кострижев, С. А. Чукмасов. – М.: Металлургия, 1992. – 283 с.
22. Красиков, А.В. Исследование процесса раскатки труб на агрегатах с непрерывными станами с целью повышения износостойкости оправок. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2015.
23. Лубе, И. И. Исследование и совершенствование технологии горячей прокатки труб из непрерывнолитой заготовки на агрегатах с непрерывным станом / дис. Лубе И. И. канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 26.05.10. – М., 2010 – 147 с.
24. Теелен, Н. Современная технология для производства бесшовных труб на заводе в Тяньцзине / Н. Теелен, П. Ринальди, Д. Миланезе, Я. Цзешен // *Металлургическое производство и технология*. – 2005. – №1. – С.40–50.
25. Yan, Z. PQF Process / Z. Yan, Q. Sun, G. Zhuang. – *Steel Pipe*, 2006(2), Vol. 35, No.1. – p. 37 – 42.
26. Клачков, А.А. Опыт эксплуатации первого в России непрерывного стана с трехвалковыми клетями PQF 10 3/4" в ОАО «Тагмет» // *Сталь*, 2011. – №11. – С.85–88.
27. FQMTM: Danieli's 3-roll pass retained mandrel mill for high quality seamless tube production / E. Chernuschi // Danieli Centro Tube, Italy. – p.6. - www.danielicorp.com.
28. Ершов, Ю.Л. PQF/MPM- особенности проектирования непрерывного оправочного стана / Ю.Л. Ершов, Б.И. Тартаковский // *Теория и практика металлургии*, 2009. – №5–6. – С. 3–14.
29. Ершов, Ю.Л. Особенности проектирования непрерывных оправочных станов с двух- и трехвалковыми клетями / Ю.Л. Ершов, Б.И. Тартаковский // *Бюллетень «Черная металлургия»*, М.: ОАО «Черметинформация», 2011. – №10. С.80–91.

30. Чекмарев, И. А. Разработка научных основ и рациональной технологии непрерывной прокатки труб: автореферат дис. ... н д-ра техн. наук. / И.А. Чекмарев. — Москва, 1978. — 44 с.

31. Чекмарев, И.А. Исследование непрерывной прокатки труб на длинной оправке: автореферат дис. ... канд. техн. наук. / И.А. Чекмарев. — Днепропетровск, 1960. — 22 с.

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

33. Гульянов Ю.Н., Нодев О.Э., Столетний М.Ф. Рациональная деформация металла в непрерывном стане / Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года— Днепропетровск: ВНИТИ, 1968.-С. 83-88.

34. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: Справочник /А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, ВТ. Тилик. - М.: Metallургия, 1982. - 312 с.

35. Особенности деформации труб при непрерывной прокатке на длинной оправке / Г.И. Гуляев, И.П. Савкин, И.А. Чекмарев и др. // Производство труб: Сб.-М.: Metallургия, 1971, № 2 6 - С. 31-36

36. Исследование деформации трубы при прокатке в круглом калибре на длинной оправке / Я.Л. Ваткин, А.А. Шевченко, Г.И. Гуляев и др. // Обработка металлов давлением. Научные труды ДМЕТИ — М.: Metallургия, 1967, №53.-С. 169-177

37. Вавилкин, Н.М. Особенности кинематических параметров раскатки на непрерывном стане / Н.М. Вавилкин, В.А. Сербин // Изв. вузов. Черная металлургия.— 2006.— № 7.— С. 33-35.

38. Онищенко, И.И. Теория непрерывной прокатки / И.И. Онищенко, П.И. Куценко, А.И. Куценко. — Запорожье: ЗГИА, 1998. — 470 с.
39. Чекмарев, А. П. Теория трубного производства / А.П. Чекмарев, В.М. Друян — М.: Metallurgy, 1976. — 304 с.
40. Шевченко, А.А. Непрерывная прокатка труб / А.А. Шевченко. — Харьков: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1954. — 268 с.
41. Выдрин, А.В. Теоретические основы повышения точности размеров труб при прокатке на непрерывном стане / А.В. Выдрин, В.В. Широков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». — 2011. — №14(231). — С. 81-86.
42. Шифрин, Е.И. Анализ формоизменения и повышение точности труб при прокатке на непрерывном стане / Е.И. Шифрин, А.В. Выдрин, В.И. Чурбанов, В.В. Широков, А.В. Никитюк, А.К. Беломестнов // Трубное производство. — 2010. — №12(1332). — С. 49-54.
43. Шкуратов, Е.А. Совершенствование технологии продольной прокатки полых заготовок на непрерывных раскатных станах / Е.А. Шкуратов, А.В. Выдрин // Черные металлы. — 2017. — № 3. — С. 42 – 46.
44. Yue, Sh. Design and Development of $\phi 382$ mm Pass of PQF Mill / Sh. Yue, Y. Liu, H. Guo. — Steel Pipe, 2009, Vol. 38, No.3. — p. 46 – 49.
45. Шкуратов, Е.А. Совершенствование технологии продольной прокатки полых заготовок на непрерывных раскатных станах / Е.А. Шкуратов, А.В. Выдрин // Черные металлы. — 2017. — № 3. — С. 42 – 46.
46. Правосудович, В.В. Дефекты стальных слитков и проката: справочное издание / В.В. Правосудович, В.П. Сокуренок, В.Н. Данченко и др. — М.: Интермет Инжиниринг, 2006. — 384 с.
47. Барадынцева, Е.П. Трансформация дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки при производстве бесшовных горячекатаных труб на РУП «БМЗ» / Глазунова Н.А., Рожкова О.В// Литье и металлургия. 2008. №4 (49). С. 38 40.

48. Атлас дефектов стали / Под ред. М.Л. Бернштейна, пер. с немецкого Е.Я Капуткина. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.
49. Иосифов, Ю. М. Влияние формы калибра на характер контактных напряжений и износ инструмента автоматического стана Ю. М. Иосифов, Л. Л. Ситников, С. В. Сериков // Продольная прокатка труб. – Челябинск, 1980. – С. 104–106.
50. Сериков, С. В. Совершенствование методики расчёта многогранной калибровки валков / С. В. Сериков, Ю. М. Иосифов // Всесоюзная научно-техническая конференция «Совершенствование процессов продольной прокатки труб». – Челябинск, 1980. – С. 126–128.
51. Zhong, X. PQF & FQM three-roll mandrel mill / X. Zhong. – 2009(5)–р. 13–20.
52. Ku, H. Development of Structure of 3-roll Mandrel Pipe Mills and Relevant Comparative Analysis / H. Ku, G. Xiao, Y. Chang, P. Zhang. – Steel Pipe, 2015(6), Vol. 44, No.3. – р. 59 – 62.
53. Шкуратов, Е. А. Исследование влияния величины овальности чистовых калибров трёхвалкового непрерывного оправочного стана FQM на формоизменение раската / Е. А. Шкуратов, Д. О. Струин, И. Н. Черных и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Металлургия. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ. — 2015. – Т. 15, № 3. – С. 139–147.
54. 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.
55. Вавилкин, Н. М. Особенности исследования теплового и термонапряжённого состояний длинных оправок непрерывного стана при раскатке труб / Н. М. Вавилкин, А. В. Красиков // Трубное производство. – 2010. – №8. – С. 25–28.

56. Каргалицкий, А. С. Повышение точности размера труб при прокатке на непрерывных оправочных станах / А. С. Каргалицкий, О. А. Пляцковский // Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ. – 1966. – №8. – С.43–45.
57. Швейкин, В. В. Причины образования поперечных трещин на трубах при прокатке в круглом калибре на оправке / В. В. Швейкин // Сталь. – 1949. – №3.
58. Ваткин, Я.Л. опережение металла при прокатке труб в автоматическом стане / Я. Л. Ваткин // Научные труды, ДМетИ: Вып. №27. – Харьков, Москва: Metallurgizdat, 1951. – 172 с.
59. Ваткин, Я.Л. Бюллетень института «Черметинформация» [Текст] / Я. Л. Ваткин. – 1965. – №20. – С. 48.
60. Чекмарёв, А. П. Известия вузов / А. П. Чекмарёв и др. // Черная металлургия. – 1964. – №4. – С.77.
61. Ваткин, Я.Л. 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.
62. Выдрин, А. В. Расчет межклетевых натяжений при прокатке труб в трехвалковом непрерывном оправочном стане / 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.
63. Шкуратов, Е.А. Оптимизация процесса непрерывной раскатки гильз с целью повышения точности горячекатаных бесшовных труб / Е.А. Шкуратов, дис., канд. техн. наук: 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: защищена 13.12.2017. – Ч., 2017 – 166 с.
64. Гуляев, Ю. Г. Повышение точности и качества труб / Ю. Г. Гуляев, М. З. Володарский, О. И. Лев, С. А. Михеев, Г. П. Кострижев, С. А. Чукмасов. – М.: Металлургия, 1992. – 283 с.

65. А.С. Журба, С. А. Скоромный, И.П. Иванов, Е.И. Панюшкин, Г.О. Харкин. Исследование режимов работы оправок непрерывного стана и разработка новой технологической смазки. Сталь №6, 1989 г. – с. 61-63.
66. Иосифов, Ю. М. Влияние формы калибра на характер контактных напряжений и износ инструмента автоматического стана / Ю.М. Иосифов, Л. Л. Ситников, С.В. Сериков // Продольная прокатка труб. – Челябинск, 1980. – С. 104–106.
67. 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.
68. Друян, В.М. Теория и технология трубного производства / В.М. Друян, Ю.Г. Гуляев, С.А. Чукмасов – Днепропетровск, РИА «Днепр-ВАЛ», 2001. – 544 с.
69. Швейкин, В. В. Причины образования поперечных трещин на трубах при прокатке в круглом калибре на оправке / В. В. Швейкин // Сталь. – 1949. – №3.
70. Гуляев, Г. И. Особенности деформации труб при непрерывной прокатке на длинной оправке / Г. И. Гуляев, И. П. Савкин, И. А. Чекмарев и др. // Производство труб: сборник – М.: Металлургия, 1971. – № 26 . – С. 31–36.
71. Романцев, Б. А. Условия работы, перемещаемых с заданной скоростью раскатных оправок непрерывных трубопрокатных станов /Е. Н. Панюшкин, С. В. Кондратьев, А. В. Гончарук // Производство проката. – М, 2014. – №3 – С.19–22.
72. Лавров, П. П. Определение основных параметров при прокатке труб в непрерывном стане на длинной оправке / П. П. Лавров // Труды ВНИИМЕТМАШ. – М., 1963. – №8. – С. 193–212.
73. Онищенко, И. И. Теория непрерывной прокатки / И. И. Онищенко, П. И. Куценко, А. И. Куценко. – Запорожье: ЗГИА, 1998. – 470 с.

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

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

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

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

78. Гескин, С. А. Прокатка труб точных размеров на непрерывном стане / С. А. Гескин, П. В. Савкин // Сталь. – 1955. – № 7. – С. 621–626.

79. 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.

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

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

82. Савкин, И. П. Исследование деформации металла и усилий при прокатке труб на непрерывном оправочном стане / Автореферат

диссертационной работы, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Днепропетровск, 1966. – 25 с.

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

84. Никитюк, А. В. Определение допускаемого износа чистовых калибров непрерывного стана с удерживаемой оправкой / 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.

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

86. Выдрин, А.В. Компьютерное моделирование скоростного режима непрерывной прокатки труб / А.В. Выдрин, В.В. Широков //Сталь. – 2011. - №2. – С.56-58.

87. Выдрин, В.Н. Процесс непрерывной прокатки / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко, В.И. Крайнов. – М.: Metallurgia, 1970. – 456 с.

88. Выдрин, В.Н. О постановке и решении задач непрерывной прокатки / В.Н. Выдрин // Теория и технология прокатки: тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЧПИ. – 1989. – С. 3-13.

89. Старченко, Д.И. Кинематика продольной прокатки / Д.И. Старченко – К.: Учебно-методический кабинет высшего образования (УМК ВО), 1992. – 276 с.

90. Пьянков, Б.Г. Разработка компьютерной модели ТПА со станом FQM для определения степени влияния возмущающих параметров на результаты процесса прокатки / Б.Г. Пьянков, А.В. Выдрин, В.В. Широков // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД

2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». Ч. 2, - М.: ООО «Белый ветер». – 2014. – С. 95-102.

91. 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.

92. Выдрин А.В., Аль-джумаили Мохаммед Жасим Мохаммед, Шкуратов Е.А // Алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане / Вестник МГТУ. – 2019. – С. 32–37.

93. Храмов, Е.В. Повышение эффективности изготовления горячедеформированных труб на основе физического и математического моделирования процесса редуцирования: Дис....канд. тех. наук: 05.16.05. / Храмов Евгений Владимирович. – Челябинск, 2017. – 165 с.

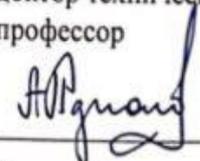
94. Колмогоров, В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.

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

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе,
доктор технических наук,
профессор


_____ А.А. Радионов
« _____ » _____ 2020 г.

АКТ

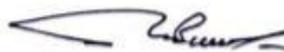
внедрения результатов диссертационной работы
Аль-Джумаили Мохаммеда Жасима Мохаммеда в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Аль-Джумаили Мохаммеда Жасима Мохаммеда внедрены в учебный процесс в виде рекомендаций, применяемых при подготовке практических занятий и самостоятельной работы бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» и магистров 22.04.02 «Металлургия» по профилю подготовки «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск.

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


_____ Л.В. Радионова

Декан факультета материаловедения
и металлургических технологий,
кандидат технических наук, доцент


_____ М.А. Иванов

Приложение Б



УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор ПАО «СТЗ»

В.А. Топоров

2020 г.

АКТ

об использовании методики настройки и расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз

При рассмотрении специалистами ПАО «СТЗ» и ОАО «РосНИТИ» результатов диссертационной работы аспиранта ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» Аль-джумаили Мохаммеда Жасима Мохаммеда установлено, что разработанная на основе энергостатического метода и эмпирических зависимостей методика расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз в многоклетевом раскатном стане, в частности применительно к технологии раскатки гильз на стане FQM, позволяет с высокой степенью точности определять усилие прокатки в черновых и чистовых клетях стана с погрешностью менее 1%.

Реализованная в виде программного продукта методика настройки и расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз принята для дальнейшего использования в работе специалистами НИЦ ПАО «СТЗ», в частности для разработки и освоения новых видов продукции с повышенными прочностными свойствами, а также для предварительного анализа технологии и поднастройки стана FQM в процессе производства трубной продукции.

Начальник технического отдела

В.Л. Пятков

Начальник трубопрокатной лаборатории

О.А. Панасенко