

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2020

**Работа выполнена** на кафедре «Процессы и машины обработки металлов давлением» (ПиМОМД) в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»).

**Научный руководитель: Выдрин Александр Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
кафедра «Процессы и машины обработки металлов давлением» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», профессор

**Официальные оппоненты:**

**Раскатов Евгений Юрьевич,** доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металлургических и роторных машин» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»), г. Екатеринбург.

**Лубе Иван Игоревич,** кандидат технических наук, главный прокатчик ПАО «Трубная металлургическая компания» (ПАО ТМК), г. Москва.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук», г. Екатеринбург.

**Защита диссертации состоится** 09 сентября 2020 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.01 при ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд 1001.

**С диссертацией можно ознакомиться**

в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» и на сайте:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/al-dzhumaili-mohammed-zhasim-mohammed>

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

e-mail: aljumailimohamad@gmail.com

**Автореферат разослан** « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Шабурова Н.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

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, или редуционно-растяжные станы.

В современном непрерывном раскатном стане деформация гильз распределяется, как правило, между 5-6 клетями с 3-валковыми калибрами в отличие от традиционных непрерывных раскатных станом, оснащенных 7-9 клетями с 2-валковыми калибрами. Это 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 с использованием непрерывного раскатного стана.

Следует отметить, что непрерывные раскатные станы нового поколения появлялись в России сравнительно недавно. 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.

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 станков, 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*.

### **Степень разработанности темы исследования**

Процесс раскатки гильзы на ТПА с непрерывным станом с трехвалковыми клетями и удерживаемой оправкой недостаточно изучен как в России, так и за рубежом. Тем не менее следует отметить, что 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. Но большинство известных в настоящее время исследований проведено для станков с двухвалковыми клетями, имеющих определенные отличия в сравнении с трехвалковыми. Также в основном были исследованы процессы деформации с плавающей оправкой. Все это не позволяет перенять в полном объеме накопленный опыт исследования процессов деформации в непрерывных раскатных станах с трехвалковыми клетями и удерживаемой оправкой.

**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 отдельно взятой 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, способствуют определению рациональных режимов деформации как для действующей технологии прокатки, так и при освоении 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)».

- 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.

### **Положения, выносимые на защиту**

Результаты исследования технологии раскатки гильз на непрерывном раскатном стане с трехвалковыми клетями; исследование параметров формоизменения при различных соотношениях  $D/S$  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.

### **Методы исследований и достоверность полученных результатов**

Для совершенствования разработанной методики и алгоритма расчета энергосиловых параметров проведены экспериментальные исследования на лабораторном прокатном стане. Математические модели для расчета уширения и угла охвата оправки, необходимые для более точного определения площади контактной поверхности по клетям стана выявлены на основе метода наименьших квадратов и приемов матричной алгебры. Для выявления зависимостей скорости оправки на энергосиловые параметры процесса проведено компьютерное моделирование в среде Qform-3D, основанное на методе конечных элементов. Построение геометрических моделей осуществлено с использованием системы Компас-3D. Сопоставление результатов расчета с производственными данными имеет высокую степень сходимости.

### **Апробация работы**

Основные результаты исследования опубликованы в ряде научно-технических изданий и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе международных: XXII Международная научно-практическая конференция «Трубы-2018», г. Челябинск ; The first International Conference on Materials Engineering and Science, (IConMEAS), Аудин, Турция, 2018г.; 8-я научная

конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральского Государственного Университета, г. Челябинск, 2018 г.; 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, (IConMEAS), Технологический университет, Ирак, 2019.

### **Публикации**

Основное содержание диссертации опубликовано в 5 печатных работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, и 1 статья в издании, входящем в перечень международного цитирования Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, изложена на 125 страницах машинописного текста, включающего 59 рисунков, 24 таблицы, список использованных источников из 95 наименований отечественных и зарубежных авторов, 2 приложений.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

**В первой главе** представлены основные особенности процесса непрерывной продольной раскатки гильз на оправке в многоклетевом стане. Технологические особенности процесса непрерывной раскатки гильз. Проанализированы методики расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз.

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 станом, и

методики расчета скоростных режимов, учитывающие состояние заготовки между клетями непрерывного стана.

**Во второй главе** осуществлена разработка математической модели и методики для расчета энергосиловых параметров. Усилия, действующие на валки и оправку определяются с помощью энергостатического метода. Расчетная схема, на основе которой делался вывод, приведен на рисунке 1. Основные уравнения равновесия сил записываются в виде:

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

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 продольного напряжения соответственно;

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

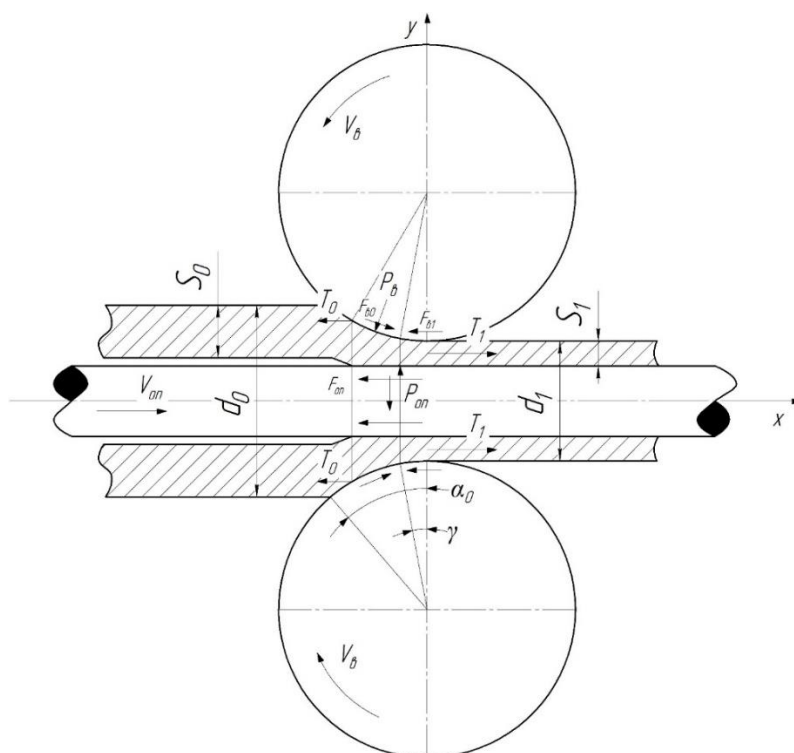


Рисунок 1 – Схема действия сил в продольном сечении очага деформации

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



Из условия равновесия проекций сил на продольную ось имеем:

$$P_{cp} = \frac{\pi}{nF_K \sin \frac{\alpha_0}{2}} [S_k \sigma_1 (d_x - s_k) - s_H \sigma_0 (d_H - s_H)] - f \sigma_{ср} \frac{F_{K1} - F_{K0}}{F_K} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0}{2}$$

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

$$P_{on} = P_{cp} \frac{F_K}{F_{Kon}} \cos \frac{\alpha_0}{2} - f \sigma_{ср} \frac{F_K - F_{K0}}{F_K} \sin \frac{\alpha_0}{2}.$$

где  $n$  – число валков, образующих калибр;

$F_K$  – площадь контактной поверхности трубы с валком;

$d_H$  – средний диаметр трубы на входе в очаг деформации;

$d_k$  – средний диаметр трубы на выходе из очага деформации;

$s_H$  – толщина стенки трубы на входе в очаг деформации;

$s_k$  – толщина стенки трубы на выходе из очага деформации;

$\sigma_0$  – напряжение от заднего продольного усилия;

$\sigma_1$  – напряжение от переднего продольного усилия;

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

$F_{K1}$  – площадь зоны опережения;

$F_{K0}$  – площадь зоны отставания;

$\alpha_0$  – угол захвата;

$f_{on}$  – коэффициент трения на контакте с правкой;

$F_{кон}$  – одна треть площади контакта металла с оправкой.

В формулу для расчета усилия входят величины продольного напряжения  $\sigma_0$  от действия заднего продольного усилия и напряжения  $\sigma_1$  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, не имеющей под собой физического обоснования. В основу разрабатываемой методики определения напряжений был положен энергетический метод.

В процессе продольной прокатки труб на оправке в очаге деформации затрачиваются следующие виды мощности: мощность формоизменения  $N_{\phi}$  и мощность сил трения-скольжения  $N_{т}$ . Подводятся в очаг деформации мощность со стороны приводных валков  $N_{в}$  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 координата 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 строго теоретически определен из уравнения баланса мощностей, записанного для всего непрерывного стана. Это уравнение является суммой уравнений балансов мощностей для отдельно взятых клеток. Однако практически решить такое уравнение сложно, так как оно сводится к достаточно громоздкому нелинейному уравнению. Поэтому для упрощения решения задачи было принята следующая гипотеза: поскольку последняя клетка непрерывного раскатного стана осуществляет малую деформацию и коэффициент вытяжки в ней близок к единице предлагается скорость выхода металла из последней клетки принять равной средней линейной скорости вращения валков последней клетки стана. С учетом этого можно легко определить величину секундного объема и получить решение задачи.

После определения величины секундного объема и ее подстановки в уравнение баланса мощностей было получено выражение для определения напряжения  $\sigma_1$ :

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

Однако, полученное уравнение содержит неизвестную величину  $\sigma_0$  – напряжение от заднего продольного усилия

Для дальнейшего решения поставленной задачи был разработан 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:

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

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 клетки 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 разработанным формулам определяется давление на валки и оправку в каждой из клеток непрерывного раскатного стана.

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 непрерывном раскатном стане. Сопоставление результатов расчета с производственными данными показало высокую степень сходимости (рисунок 2), особенно в последних 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.

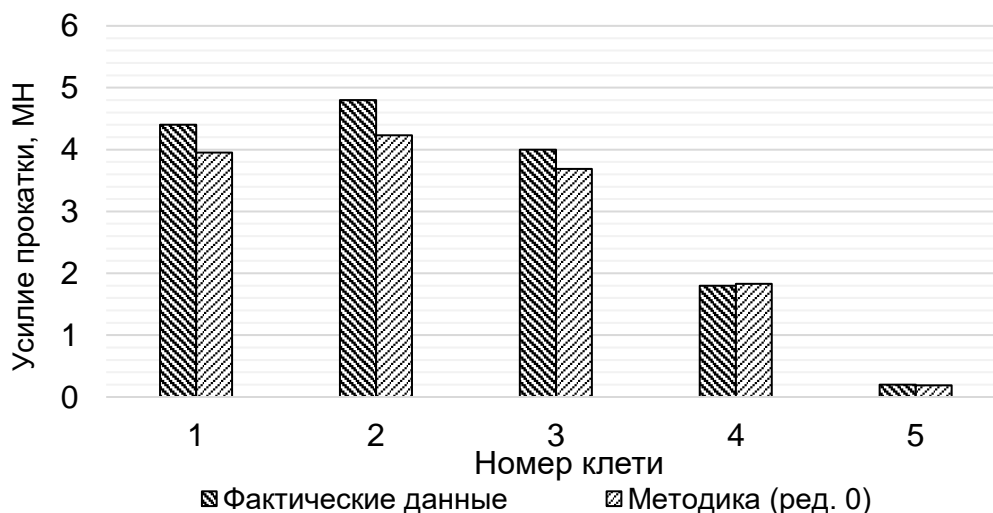


Рисунок 2 – Результаты сопоставления величины усилия на валки по клетям непрерывного стана

Полученное различие между усилиями на валки для черновых клеток 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 известно, что при непрерывной прокатки протекают процессы, как свободного формоизменения (например, уширение).

**В третьей главе** представлены основные результаты экспериментального исследования формоизменения в очаге деформации при продольной прокатке труб на оправке. В частности, для 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.

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. В качестве модельного материала использовались свинцовые полые заготовки, предварительно обточенные на токарном станке. Экспериментальные исследования процесса раскатки на цилиндрической оправке проведены для гильз с разным отношением наружного диаметра к толщине стенки ( $d/s$ ). Зазор между оправкой и внутренним диаметром гильзы принят постоянной величиной. Прокатка патрубков в трехвалковом калибре осуществлялась на цилиндрической оправке диаметром  $31,6 \pm 0,1$  мм, с частотой вращения валков 5,0 об/мин. Результаты экспериментального исследования представлены и на рисунках 3, 4.

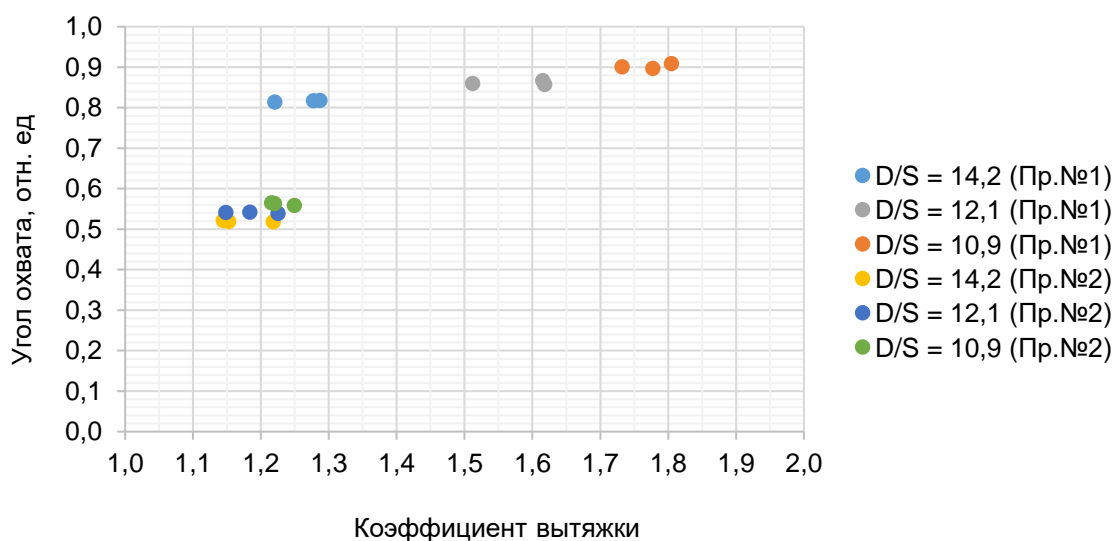


Рисунок 3 – Изменение угла охвата оправки после двух проходов в зависимости от коэффициента вытяжки

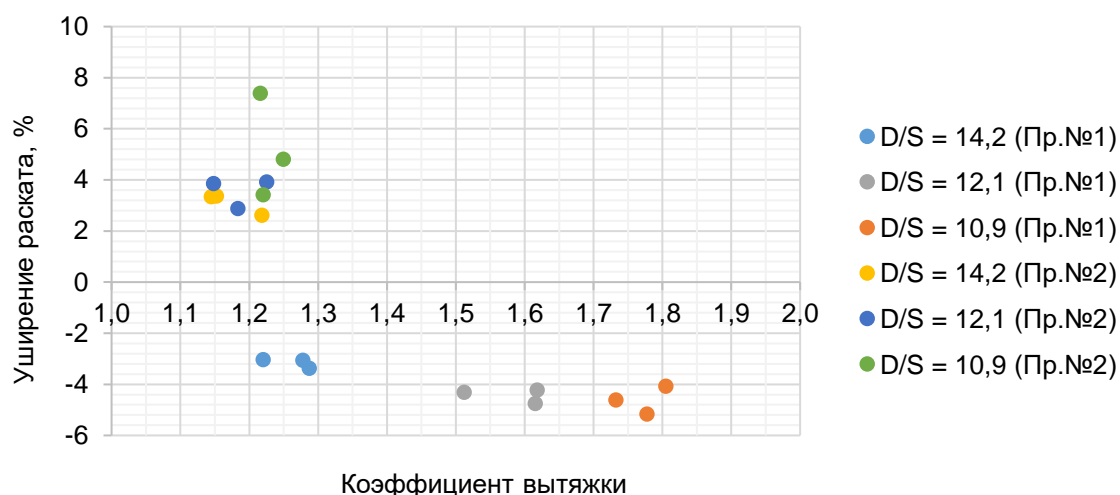


Рисунок 4 – Изменение уширения раската после двух проходов в зависимости от коэффициента вытяжки

Полученные экспериментальные данные далее были 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 3, 4, не значительно.

Для определения численных значений коэффициентов уравнения регрессии по экспериментальным данным был применен метод наименьших квадратов. С этой целью нелинейные зависимости, приведенные на рисунках 3 и 4 предварительно были линеаризованы путем соответствующей замены переменных. Коэффициенты были определены из условия минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных данных от расчетных или суммы квадратов невязок. Невязка линейного уравнения записывается в виде:

$$R_i = Y_i - A - BX_i$$

где  $Y_i$  - экспериментально определенное значение функции отклика;

$X_i$  - соответствующее функции  $Y_i$  фактическое значение аргумента;

$A$  и  $B$  – искомые коэффициенты уравнения регрессии.

Серия проведенных экспериментов показала, что на величину угла охвата и коэффициента уширения основное влияние оказывает коэффициент вытяжки  $\mu$ . Влияние других факторов выражено менее заметно. Статистическая обработка полученной экспериментальной информации позволила получить следующие формулы:

- для угла охвата:

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

- для коэффициента уширения:

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

В ходе обработки результатов компьютерного моделирования получена уникальная математическая зависимость, позволяющая оперативно определять усилие, действующее на оправку в зависимости от параметров процесса прокатки:

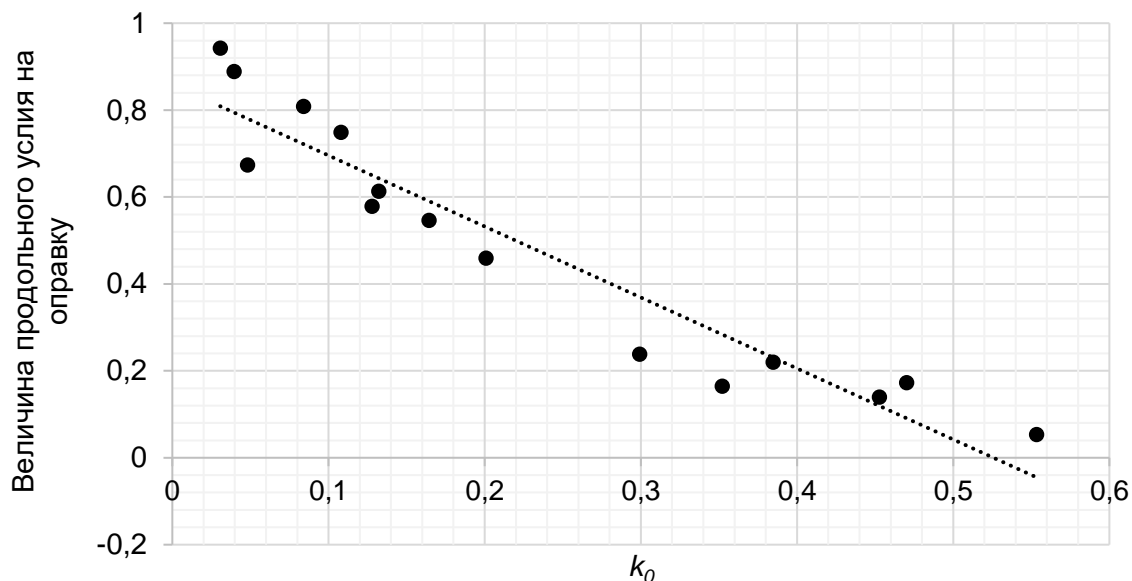


Рисунок 5 – Влияния параметров процесса прокатки на распределение продольного усилия на оправку

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

1) площади контактной поверхности с оправкой и валками:

$$F_{\kappa o} = l_{od} \left[ \frac{\pi R_{\kappa}}{90} \cdot (\mu - 1)^{0,331} \right];$$

$$F_{\kappa в} = \frac{1}{2} b \cdot l_{od} \left[ 1,77 + \frac{0,296}{\mu} \right].$$

2) продольное усилие, действующее на оправку:

$$k_{0_i} = -1,63 \cdot \frac{v_{onp}}{v_{вал_i}} \cdot \mu_i \cdot \varepsilon_i + 0,86.$$

Полученные формулы после подстановки в математическую модель расчета параметров процесса непрерывной раскатки труб на оправке позволили уточнить получаемые результаты.

Сопоставление результатов представлено на рисунке 6.

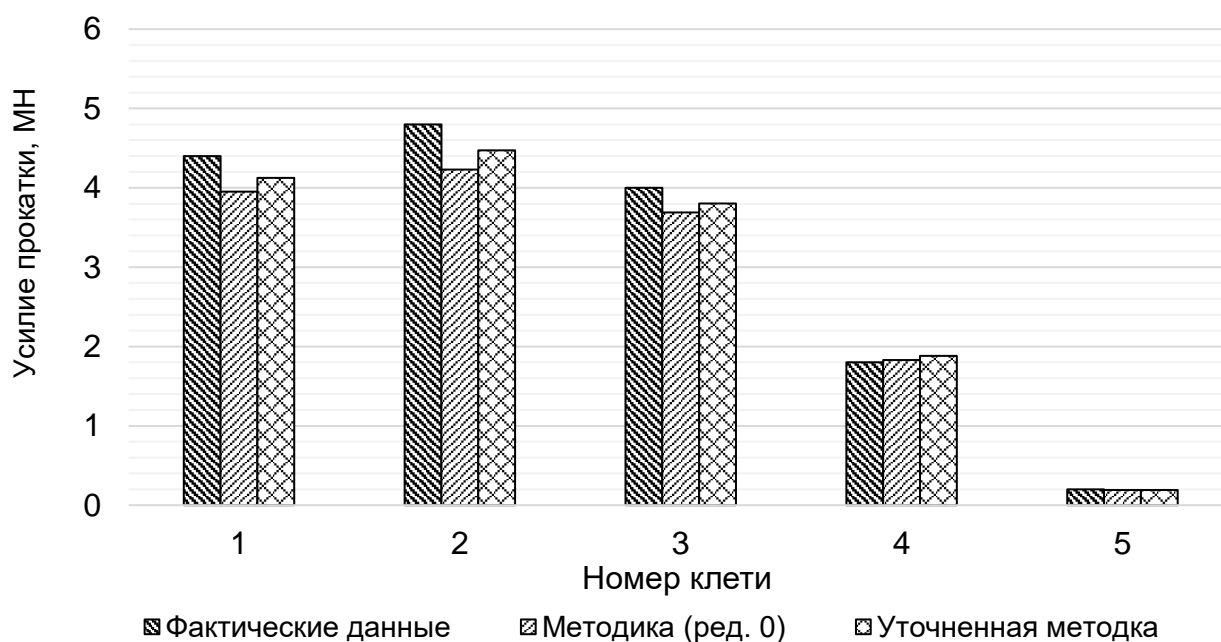


Рисунок 6 – Распределение усилий по клетям стана

В результате проведенных исследований получено следующее:

- уточненная методика позволяет получать более близкие к реальным значения усилия прокатки. Оставшаяся погрешность при этом для клеток 1-3 составляет примерно 0,55%. Первоначально разработанная методика уточнена на 6%.
- 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 в черновых клетях стана.

**В четвертой 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. Реализация программы на основе разработанной методики осуществлена с использованием языка программирования С#.

На основе параметрического анализа исследовано влияние на энергосиловые параметры процесса следующих величин (рисунок 7):

- толщины стенки гильзы;
- наружного диаметра гильзы;
- температуры гильзы;
- коэффициента трения в системе валок-раскат;

- скорости оправки стана;
- частоты вращения валков стана.

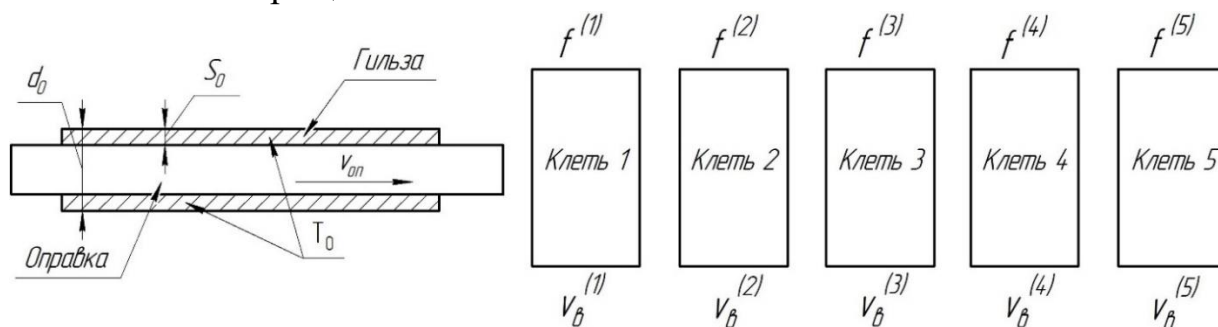


Рисунок 7 – Концептуальная схема процесса непрерывной раскатки гильзы на удерживаемой оправке:

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

$T_0$  – температура гильзы;  $v_{оп}$  – скорость оправки;  $v_в$  – скорость валков;

$f$  – Коэффициент трения в системе валок-раскат

В ходе проведенного анализа было установлено следующее:

- наибольшее влияние на усилие прокатки и межклетевое натяжение оказывает изменение толщины стенки и наружного гильзы, то есть степень деформации, а также коэффициент трения и частота 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 и частоты вращения валков относительно номинальной величины, способствующих выравниванию изменений на диаграммах распределения усилия при прокатке труб заданного сортамента. В связи с этим были выявлены закономерности влияния наиболее значимых факторов на изменение усилия прокатки и натяжения между клетями при прокатке труб различного сортамента.

При изменении позиции валков стана регистрировались следующие технологические параметры: уширение раската, угол охвата оправки и усилие на валки. 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. Это в свою



очередь приводит к необходимости уменьшения угла охвата оправки с целью беспрепятственного извлечения с нее раската (рисунок 8);

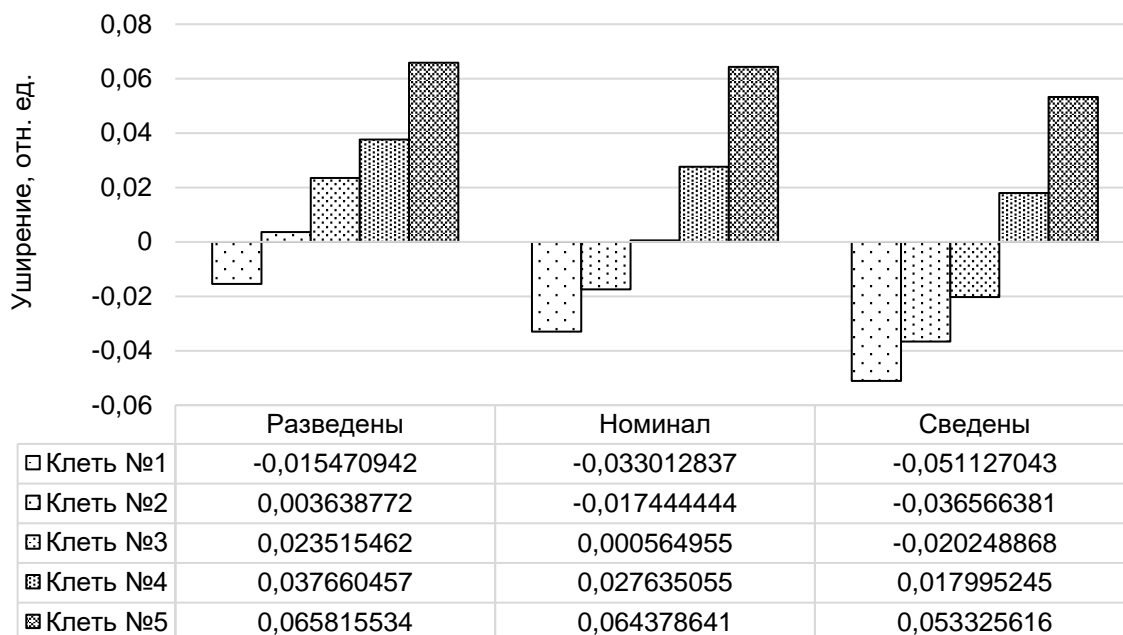


Рисунок 8 – Изменение уширения раската по клетям стана

- угол охвата оправки по клетям стана уменьшается. Причем величина сведения валков оказывает большее влияние на изменение угла охвата относительно номинального значения, чем величина разведения (рисунок 9);

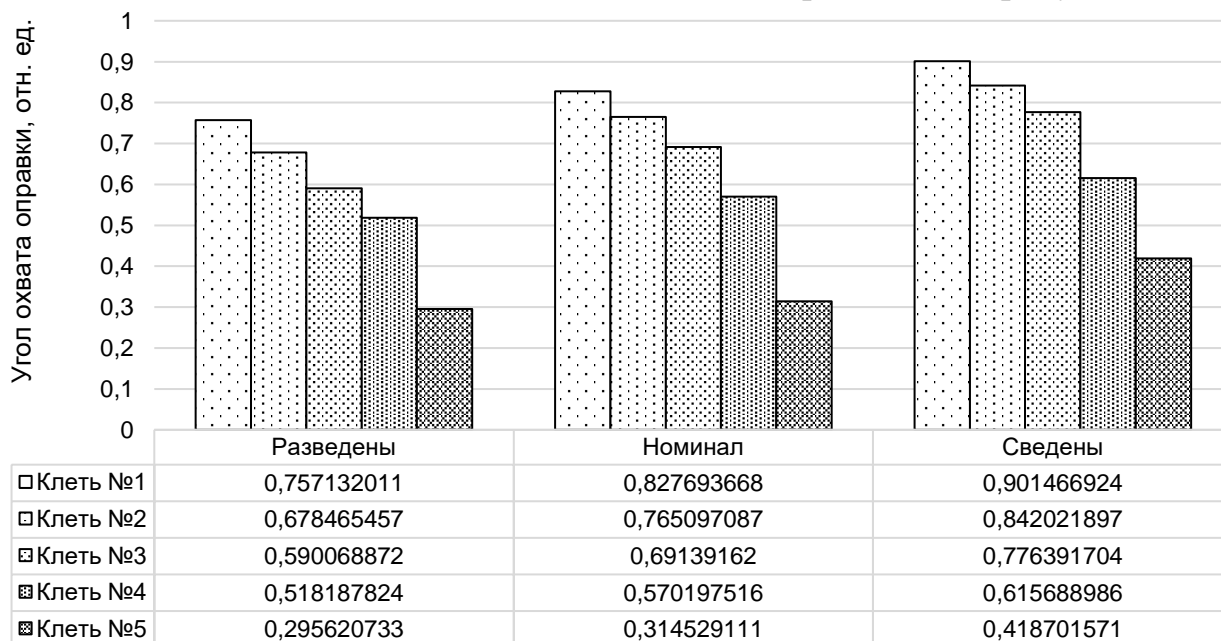


Рисунок 9 – Изменение угла охвата оправки по клетям стана

- сведение валков в черновой группе клетей оказывает значительное влияние на изменение усилия прокатки (рисунок 10). Минимальное изменение усилия в чистовой группе клетей обусловлено малой величиной обжатия.

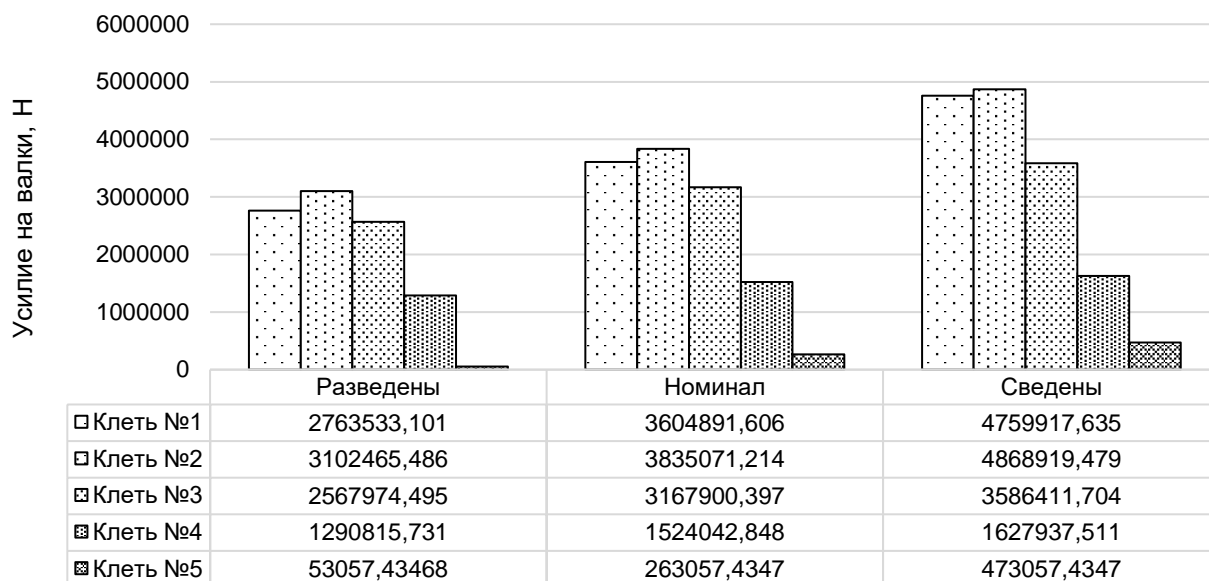


Рисунок 10 – Изменение усилия, действующего на валки по клетям стана

В соответствии с рисунком 11, предложено упрощенное выражение для оперативного вычисления усилия прокатки, позволяющее корректировать настройки непрерывного раскатного стана:

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

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

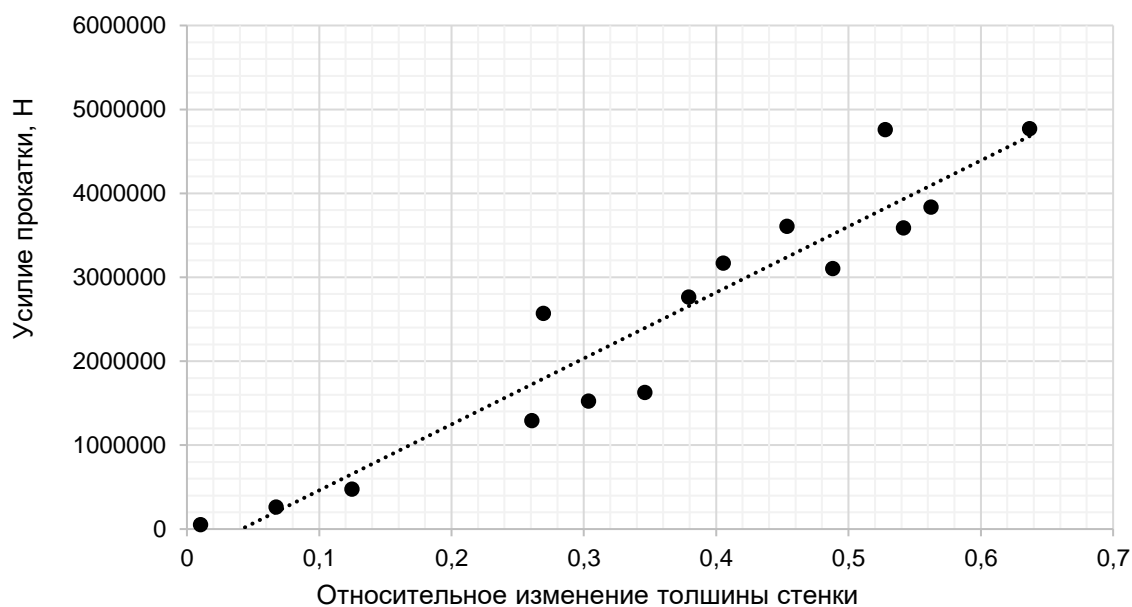


Рисунок 11 – Усилие прокатки в зависимости от позиционирования валков

В соответствии с рисунком 12, уширение раската оперативно определяется выражением:

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

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

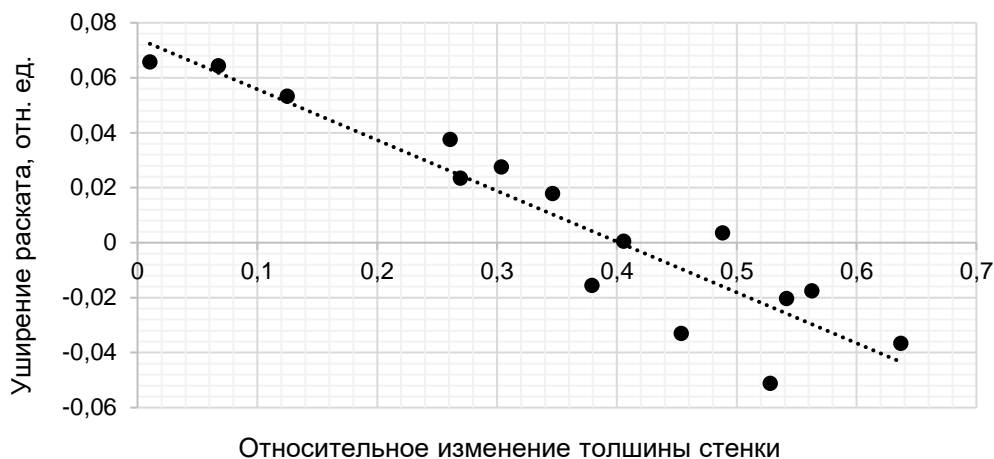


Рисунок 12 – Уширение раската в зависимости от позиционирования валков

В соответствии с рисунком 13, угол охвата оправки через заданное изменение позиционирования валков стана может быть описан выражением для оперативного определения:

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

где  $a_\alpha$  и  $b_\alpha$  – коэффициенты уравнения линейной регрессии, численно равные 0,9482 и 0,2976 соответственно.

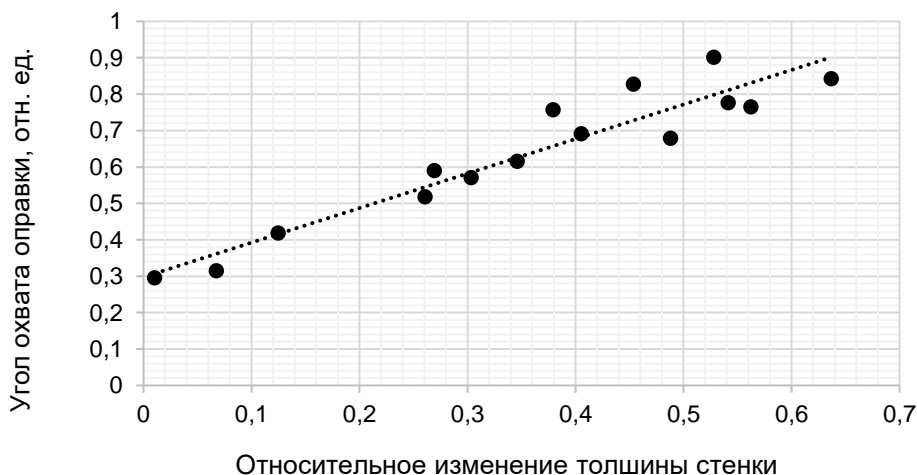


Рисунок 13 – Угол охвата оправки в зависимости от позиционирования валков

Далее на основе разработанной в главах 2 и 3 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. Изменение величин усилия прокатки и натяжения представлено на рисунках 14 и 15 соответственно.

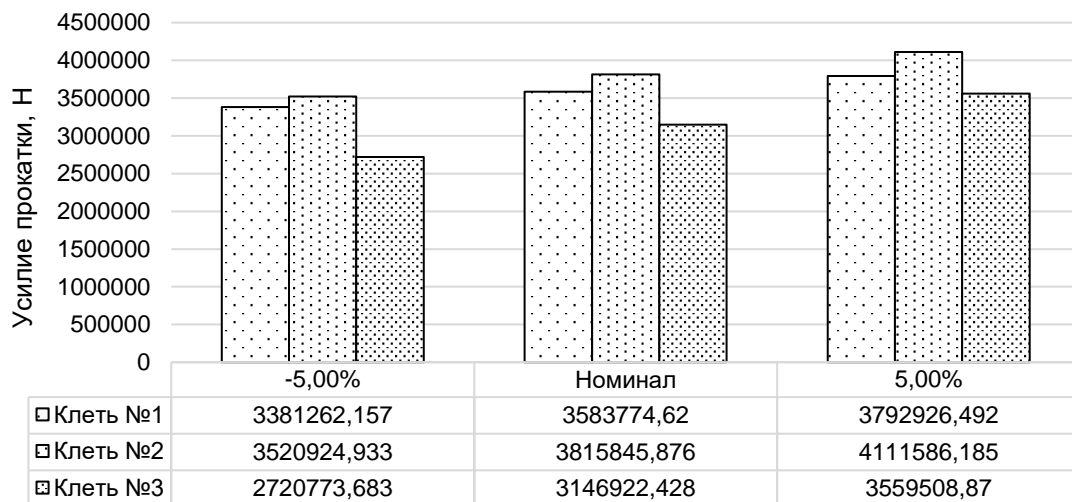


Рисунок 14 – Изменение усилия прокатки при варьировании частоты вращения валков

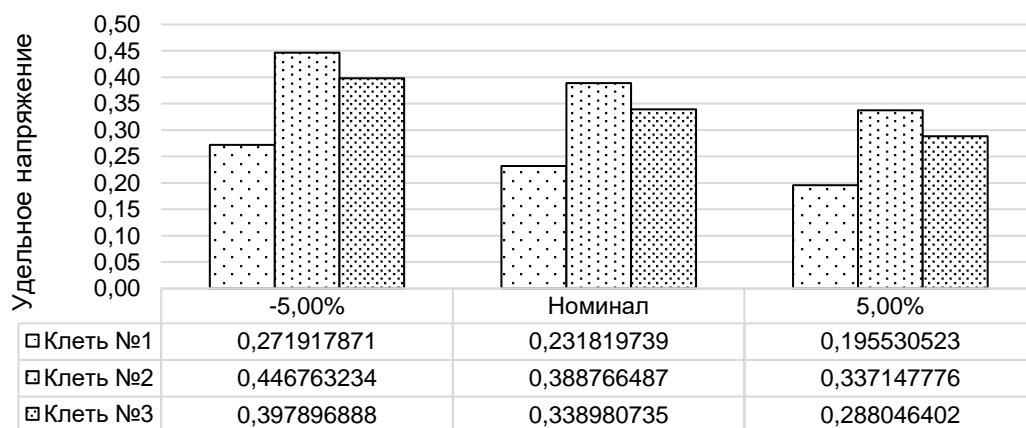


Рисунок 15 – Изменение натяжения при варьировании частоты вращения валков

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 клетке изменяется и обжатие, структурирование данных целесообразно было выполнить с учетом относительно показателя:

$$k_n = \frac{n_k}{\varepsilon},$$

где  $n_k$  – коэффициент натяжения в исследуемой клетке.

Тогда, результаты, приведенные на рисунках 14 и 15, численно могут быть описаны выражением:

$$P_{ex} = a_n \cdot k_n - b_n,$$

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

С учетом принятого относительного показателя усилия прокатки изменяется следующим образом (рисунок 16):

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

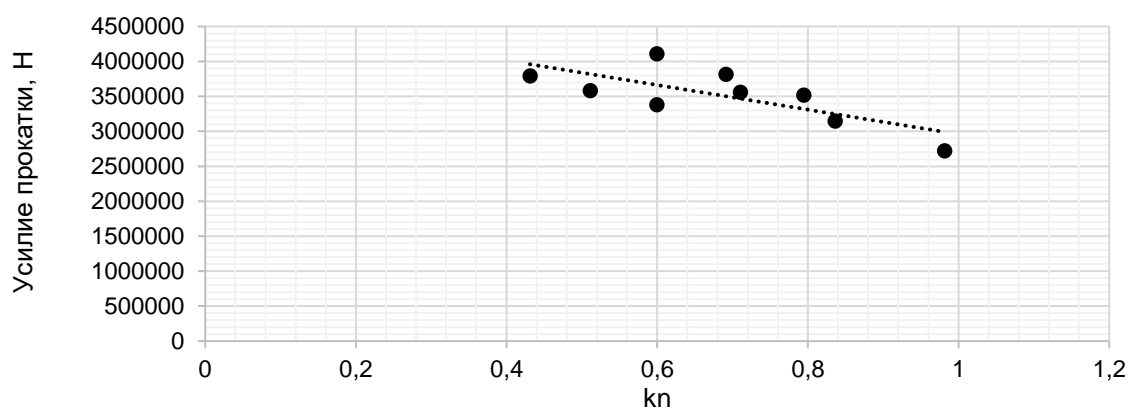


Рисунок 16 – Изменение усилия прокатки в зависимости от  $k_n$

В результате полученные математические зависимости, позволили осуществлять оперативный контроль и регламентировать основные параметры процесса непрерывной раскатки гильз. На основе данных моделей скорректированы скоростные режимы действующего непрерывного стана, что позволило снизить риск возникновения аварийных ситуаций.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И 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 в черновых клетях стана.

2. Разработаны математические модели для расчета угла охвата оправки и уширения раската уточняющие расчет площади 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. Получены 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 стабилизации диаграмм распределения усилия при прокатке труб заданного сортамента по клетям непрерывного стана.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в научных изданиях,**

**определенных ВАК РФ:**

1. Выдрин А.В., Аль-Джумаили М.Ж.М, Шкуратов Е.А. Алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане // Вестник МГТУ им. Носова. 2019. Т.17. №2.С. 32–37 (ВАК РФ)

2. Аль-Джумаили М.Ж.М., Выдрин А.В., Шкуратов Е.А. Влияние условий непрерывной раскатки гильз на технологические параметры процесса// Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 60–67. DOI: 10.14529/met200107 (ВАК РФ).

**определенных Scopus:**

3. M.J. Al-Jumaili, A.V. Vydrin., Ye.A. Shkuratov. Elaboration of A digital model for estimation of power parameters of a rolling process in a continuous rolling mill//AIP Conference Proceeding (American Institute of Physics).Volume 2213 A.2020 (Scopus) <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0000302?download=true>

**Публикации в других изданиях:**

4. Ахмеров Д.А., Выдрин А.В., Струин Д.О., Шкуратов Е.А., Аль-Джумаили М.Ж.М, Аль-Кхузаи А.С.О / Исследование процесса продольной прокатки труб в калибрах, образованных разным количеством валков//Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением ISSN: 2658-3178. №4 (27) 2018. С.38-42.

5. Выдрин А.В., Храмков Е.В., Шкуратов Е.А., Аль-Джумаили М.Ж.М., Буняшин М.В., Топоров В.А., Панасенко О.А. Развитие теоретических основ процесса непрерывной раскатки труб/ // XXIII Международной научно-практической конференции «Трубы-2018», Челябинск,2018. С. 93-99.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать \_\_\_\_ . 06.2020. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,16 Уч.-изд. л. 1. Тираж 120 экз. Заказ

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.