


На правах рукописи



Широков Вячеслав Вячеславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ
ПРОКАТКИ ТРУБ НА НЕПРЕРЫВНЫХ РАСКАТНЫХ СТАНАХ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2016

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

Научный руководитель — Выдрин Александр Владимирович

доктор технических наук,
профессор кафедры «ПиМ ОМД»
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Официальные оппоненты:

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

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

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

Защита диссертации состоится 15.02.2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.01 в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)

по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) и на сайте университета <http://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/shirokov-vyacheslav-vyacheslavovich>

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: shirokov@rosniti.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Шабурова Наталия Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. На сегодняшний день непрерывные трубопрокатные станы являются самыми перспективными агрегатами для получения бесшовных труб. Это обусловлено непрерывно растущими требованиями, предъявляемыми к трубной продукции, как по её геометрическим параметрам, так и по себестоимости. Так, по данным приведенным компанией SMS Meer в её ежегодном отчёте, в 2010 году на долю непрерывных станом типа PQF и MPM пришлось более 50% от общего объёма бесшовных труб.

Существующие методики расчёта технологических параметров носят, в основном, эмпирический характер и являются, большей частью, обобщением опыта эксплуатации непрерывных станом. Кроме того, на сегодняшний день нет однозначных и исчерпывающих данных о влиянии тех или иных параметров процесса прокатки на качество готовой продукции. Отсутствие информации о связи между такими характеристиками прокатного стана, как калибровка валков, скоростной режим и т.д. с разностенностью и другими характеристиками готовых труб значительно усложняет выбор оптимальных настроечных параметров трубопрокатного стана. В связи с этим представляется целесообразным создание научнообоснованной методики расчета скоростного режима непрерывного трубопрокатного стана. Такая методика позволила бы повысить эффективность работы ТПА с непрерывным станом, что, с учетом объемов производства, даст значительный экономический эффект.

Цели и задачи. повышение эффективности производства труб на ТПА с непрерывным станом, посредством создания научно обоснованной методики расчёта скоростных режимов непрерывной прокатки труб.

Для достижения данной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Разработать математическую модель процесса раскатки труб в непрерывном стане с удерживаемой оправкой, обеспечивающую расчёт основных параметров процесса;
2. Проверить адекватность получаемых при помощи математической модели значений параметров непрерывной прокатки посредством физического и компьютерного моделирования;
3. На основе математической модели разработать методику расчёта скоростных режимов;
4. Разработать программный продукт на основе разработанной методики, проверить его работоспособность при выпуске опытных партий труб;
5. Разработать технологические решения, направленные на увеличение точности труб.

Научная новизна:

- На основе энергетического метода разработана математическая модель процесса раскатки труб на длинной оправке в непрерывном стане;
- Определена зависимость между уровнем межклетевых напряжений и точностью труб;
- Выявлены закономерности трения на контакте поверхностей трубы и оправки для различных условий применения смазывающих веществ.

Практическая значимость:

– Разработана методика и компьютерная программа, позволяющая осуществлять расчёт непрерывного стана с учетом межклетевых натяжений (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012613142, № 2010613824 и № 2012613141).

– Новые технические и технологические решения опробованы и частично внедрены на заводах: IPSCO Koppel Tubulars L.L.C. в городе Эмбридж, штат Пенсильвания, США и АО «Волжский трубный завод».

– Результаты работы внедрены в процесс обучения студентов по направлению «Металлургия» и профилю «Обработка металлов давлением».

Методы исследований и достоверность полученных результатов. Для исследования процессов непрерывной прокатки использовалось физическое и математическое моделирование.

Математическое моделирование проводилось с использованием САЕ систем QForm 2D/3D×64, основанных на методе конечных элементов, при этом построение геометрических моделей прокатного инструмента и очагов деформаций станов осуществлялось в САД системе трехмерного твердотельного моделирования КОМПАС-3D.

Апробация работы. Основные положения диссертации и ее отдельные результаты доложены и обсуждены на следующих конференциях: XVII международная научно-техническая конференция "ТРУБЫ-2009 (г. Челябинск, 2009 г.); XIX международная научно-техническая конференция "ТРУБЫ-2011 (г. Челябинск, 2011 г.); международный научно-технический конгресс "ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии" (г. Москва, 2014 г.); XX Юбилейная научно-техническая конференция Трубы 2012 «Развитие технологий производства наукоемкой трубной продукции» (г. Сочи, 2012 г.); Молодежная научно-практическая конференция Трубной Металлургической Компании (г. Сочи, 2011 г.); Научный семинар кафедры «МиТОМД» (г. Челябинск, 2015 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 12 печатных работах, в том числе 6 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, изложена на 171 странице машинописного текста, включающего 54 рисунка, 28 таблиц, список использованных источников из 94 наименования отечественных и зарубежных авторов, 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлен обзор научно-технической литературы по вопросам повышения точности труб по толщине стенки и методикам расчёта скоростных режимов прокатки труб в непрерывных станах на длинной оправке.

Проведён анализ особенностей непрерывной прокатки: основной характерной особенностью процесса непрерывной прокатки, из которой вытекают все другие особенности, следует считать наличие или возможность взаимосвязи отдельных клетей через прокатываемый металл, а при наличии плавающей оправки, и через оправку.

Проведён анализ работ известных отечественных и зарубежных авторов, таких как А.П. Чекмарев, Ю.М. Матвеев, В.Н. Выдрин, Я.Л. Ваткин, Б.А. Романцев, В.М. Данченко, А.А. Богатов, В.Я. Осадчий, Е.И. Шифрин, В.И. Крайнов, Г.И. Гуляев, Ю.И. Блинов, А.А. Шевченко, М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт и др. посвященных расчётам скоростных режимов непрерывных станов, а также калибровке прокатного инструмента и повышению точности труб.

Выполненный обзор научно-технической литературы показал, что геометрическая точность стенки трубы формируется в основном на непрерывном раскатном стане и увеличение точности при последующих технологических операциях, как правило, невозможно.

На точность труб по толщине стенки влияют калибровка валков и скоростной режим непрерывного стана. Существует ряд рекомендаций по проектированию калибровок, но зависимости между калибровкой валков и точностью трубы носят во многом качественный характер. Влияние межклетевых напряжений на точность стенки труб изучено крайне мало.

Существующие методики расчёта коэффициентов вытяжки малоприспособны для автоматизированного расчёта, а потому, их применение на производстве довольно затруднительно.

Существующие методики расчёта скоростных режимов непрерывных станов основаны на эмпирических данных и обладают малой универсальностью, поскольку каждая из методик основана на опыте эксплуатации конкретного стана, и требует значительной адаптации при применении не только для других станов, но и при освоении новых типоразмеров на данном стане. Кроме этого, при создании методик расчёта скоростных режимов не учитывался уровень напряжений, возникающий в металле трубы в межклетевом промежутке по причине невозможности его прямого измерения.

Таким образом, вышеперечисленные факторы определяют наличие резервов для увеличения эффективности производства труб на непрерывных станах, и их использование скажется на стоимости труб, и, как следствие, на их конкурентоспособности на внутреннем и мировом рынках.

Во второй главе представлено математическое моделирование процесса непрерывной прокатки труб.

Разработана методика расчёта геометрических параметров очага деформации (длина контактных поверхностей трубы и инструмента, коэффициентов вытяжек и пр.) адаптированная для расчёта в автоматическом режиме. Поскольку

калибровка валков является симметричной, то в дальнейшем рассматривается $1/4$ очага деформации.

В связи с тем, что в общем случае профиль ручья валка описывается несколькими поверхностями различного порядка, для унификации расчётов перейдём к записи поверхности валка как функции $R_x = f(\varphi)$, где R_x - расстояние от оси валка до точки на его поверхности (Рисунок 1). Это позволит вынести определение текущего значения R_x в отдельную подпрограмму, т.е. для основной программы калибр, по сути, будет представлен в виде множества значений R_x , что позволит уйти от представления поверхности калибра как набора кусочно-гладких функции, и, как следствие, постоянной необходимости определять интервал, для которого ведётся расчёт той или иной величины. Это позволяет рассчитывать калибры, образованные сколь угодно большим количеством поверхностей, без усложнения основной программы, поскольку она будет получать необходимое значение от подпрограммы расчёта R_x . Такое представление калибра также позволяет учитывать свод-развод валков. В общем случае величина R_x определяется по формуле (1).

$$R_x = \begin{cases} f_1(\varphi), \beta_0 \leq \varphi \leq \beta_1 \\ f_2(\varphi), \beta_1 < \varphi \leq \beta_2 \\ \dots \\ f_n(\varphi), \beta_{n-1} < \varphi \leq \beta_n \end{cases}, \quad (1)$$

где $\beta_1 \dots \beta_n$ - углы выпусков.

При этом следует заметить, что формула (1) справедлива для случая, когда центр дуги данного выпуска совпадает с центром координат. Поскольку центры дуг выпусков в общем случае не лежат на оси прокатки, следует найти координатные углы точек сопряжения дуг (прямых) выпусков. Данные точки находятся из условия пересечения дуг (прямых), образующих поверхность калибра, с помощью известных зависимостей аналитической геометрии.

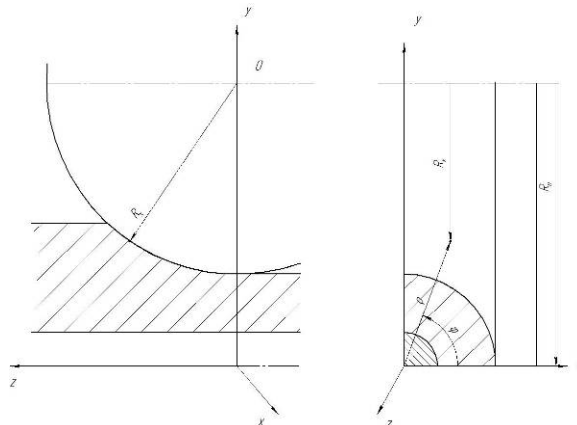


Рисунок 1 — Расчётная схема для описания поверхности калибра валка

Полученные таким образом значения координат точек на поверхности валка позволяют определить площадь поперечного сечения трубы на выходе из очага деформации. Для этого методом Сипсона находят значения интегралов

функций, описывающих поверхности валка, оправки, а также внутреннюю поверхность трубы не соприкасающуюся с оправкой. При этом абсциссы точек, соответствующих вершине калибра (A), переходу вершины калибра в выпуск (B), разьёму калибра (C), касания внутренней поверхности трубы и оправки (D) и пересечению линии разьёма валков и внутренней поверхности трубы (E) являются пределами интегрирования (Рисунок 2).

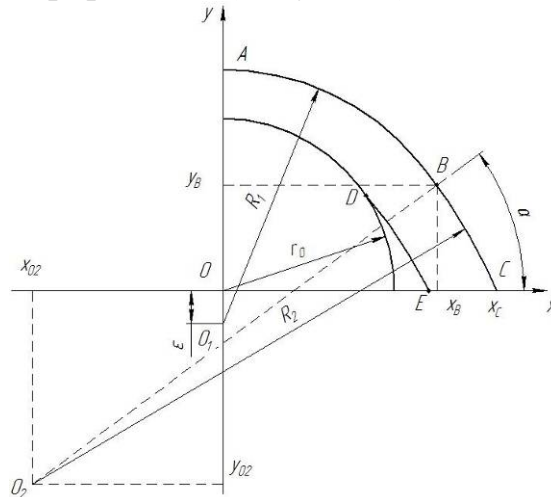


Рисунок 2 - Расчётная схема для определения коэффициента вытяжки

Таким образом, площадь поперечного сечения трубы будет определяться выражением:

$$S_{mp} = S_{AB} + S_{BC} - S_{OD} - S_{DE}, \quad (2)$$

где S_{AB} , S_{BC} , S_{OD} , S_{DE} — площади соответствующие вершине калибра (AB), выпуску калибра (BC), оправке в зоне контакта с внутренней поверхностью трубы (OD) и внутренней поверхности трубы, не контактирующей с оправкой (DE).

При этом линия DE , описывающая внутреннюю поверхность трубы, не контактирующую с оправкой, задаётся как эквидистанта выпуска калибра, лежащая от него на удалении равном толщине стенки трубы в вершине предыдущего калибра, а для первой клетки — равной толщине стенки гильзы.

Для определения длины контактных поверхностей трубы и валка, трубы и оправки решается задача о пересечении тел. Поскольку внеконтактной деформацией трубы, равно как и деформацией прокатного инструмента пренебрегаем, то задача сводится к нахождению линии пересечения цилиндра и тора. Данная задача решается отдельно для вершины калибра и каждого из выпусков. Результатом решения являются координаты точек, принадлежащих линиям пересечения поверхностей.

Следующим этапом является построение кинематически возможного поля скоростей. Скорость течения металла в очаге деформации раскладывается на проекции на три координатные оси v_z , v_ρ , v_ϕ (Рисунок 3).

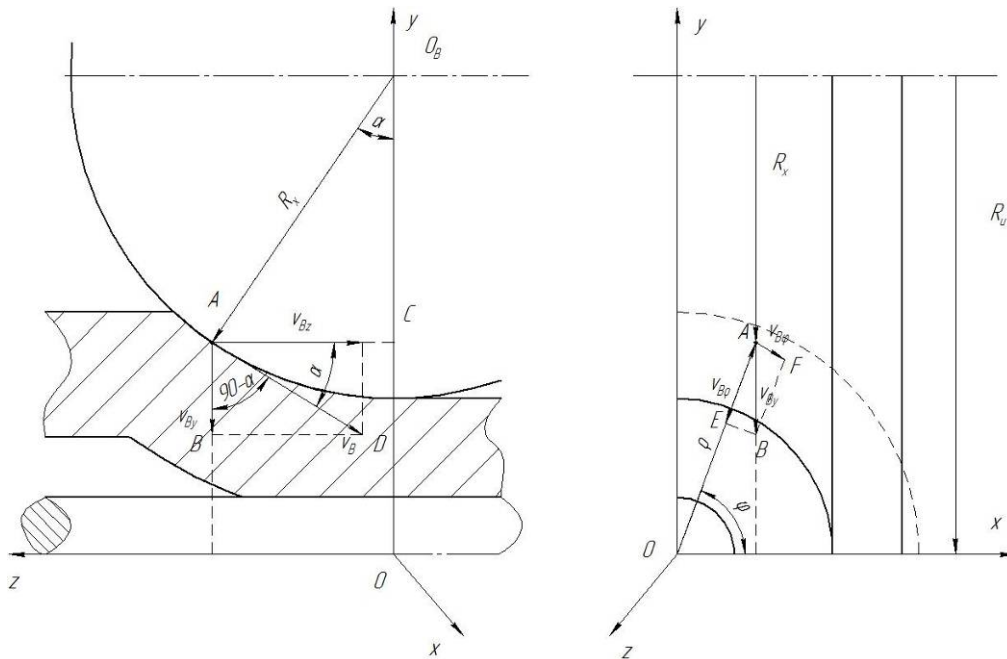


Рисунок 3 - Расчётная схема

Поскольку валки имеют цилиндрическую форму и контактная поверхность очага деформации ограничена дугой окружности, примем что продольная проекция скорости металла имеет вид:

$$v_z = a_0 + a_1 z + a_2 z^2. \quad (3)$$

В виду малой толщины стенки, примем, что компонента вектора скорости v_ρ в поперечном сечении изменяется по линейному закону. А поскольку радиальная составляющая вектора скорости металла трубы на контакте с оправкой равна нулю, выражение будет иметь вид:

$$v_\rho = b_0 (r_{on} - \rho). \quad (4)$$

Касательную составляющую вектора скорости частиц металла трубы найдём из условия неразрывности (5).

$$\frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} + \frac{v_\rho}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Касательная составляющая вектора скорости частиц будет определяться зависимостью:

$$v_\varphi = \rho \int \left(\frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} + \frac{v_\rho}{\rho} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) d\varphi + C(z, \rho), \quad (6)$$

где $C(z, \rho)$ - произвольная функция интегрирования.

После определения кинематически возможного поля скоростей по известным формулам находятся скорости деформации для цилиндрической системы координат (7), тензор скоростей деформации (8) и интенсивность скоростей деформации (9).

$$\begin{aligned} \xi_{zz} &= \frac{\partial v_z}{\partial z}; \\ \xi_{\rho\rho} &= \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\xi_{\varphi\varphi} = \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{v_{\rho}}{\rho};$$

$$\xi_{\rho\varphi} = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho \partial \left(\frac{v_{\rho}}{\rho} \right)}{\partial \rho} + \frac{\partial v_{\rho}}{\rho \partial \varphi} \right);$$

$$\xi_{z\rho} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial \rho} + \frac{\partial v_{\rho}}{\partial z} \right).$$

$$T_{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_{zz} & \xi_{z\rho} & 0 \\ \xi_{\rho z} & \xi_{\rho\rho} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{\varphi\varphi} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

$$H = \sqrt{\frac{2}{3} [(\xi_{zz} - \xi_{\rho\rho})^2 + (\xi_{\rho\rho} - \xi_{\varphi\varphi})^2 + (\xi_{\varphi\varphi} - \xi_{zz})^2]} + 4\xi_{z\rho}^2. \quad (9)$$

Для определения сил трения в методике используется закон трения Зибеля, как более предпочтительный для случая горячей прокатки. Коэффициент трения на контакте трубы с валками принят постоянным и равным 0,3, а коэффициент трения трубы об оправку равным 0,053.

Для нахождения секундного объёма составили и решили уравнение баланса мощности.

Уравнения баланса мощности для одной клетки непрерывного трубопрокатного стана имеет вид:

$$N_B + N_O - (N_{TB} + N_{TO} - N_H + N_V + N_{\Phi}) = 0, \quad (10)$$

где N_B — мощность подводимая в очаг деформации валками;

N_O — мощность сил трения на оправке;

N_{TB} — мощность трения скольжения металла по валку;

N_{TO} — мощность трения скольжения металла по оправке в продольном направлении;

N_H — мощность заднего продольного усилия;

N_V — мощность переднего продольного усилия;

N_{Φ} — мощность формоизменения.

Просуммируем уравнения баланса мощностей для всех клеток непрерывного стана.

Поскольку скорость трубы при выходе из i -той клетки будет равна скорости трубы при входе в $(i+1)$ -ю клетку, а сила переднего подпора/натяжения i -той клетки будет равна по модулю и противоположна по направлению силе заднего подпора/натяжения $(i+1)$ -ой клетки, то сумма их мощностей по всем межклетевым промежуткам будет равна нулю (Рисунок 4). Таким образом, уравнение баланса мощности для всего стана в целом будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^8 (N_B + N_O - (N_{TB} + N_{TO} + N_{\Phi}))_i = 0. \quad (11)$$

В уравнении (11) десять неизвестных – критические углы и скорости выхода металла из очагов деформации.

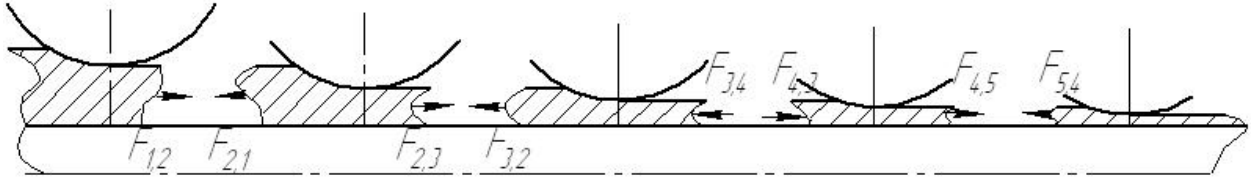


Рисунок 4. Схема межклетевого взаимодействия

Для определения критического угла используем упрощённую формулу (12) для определения опережения по вершине калибра.

$$i = \frac{R_B}{h_1} \gamma^2, \quad (12)$$

где h_1 — толщина стенки трубы по вершине калибра на выходе из очага деформации;

R_B — радиус вала по вершине калибра

γ — критический угол.

Скорость выхода металла из очага деформации и скорость вала связаны зависимостью (13).

$$v_1 = v_B (1 + i), \quad (13)$$

где v_B — скорость вала.

Запишем формулу для секундного объёма:

$$V_c = v_1 S_1, \quad (14)$$

где V_c - секунднй объём.

С другой стороны, выражение (14) с учётом (13) примет вид:

$$V_c = v_B S_1 (1 + i). \quad (15)$$

То есть правые части выражений (14) и (15) тождественно равны и с учётом формулы (12) получим следующее выражение:

$$v_1 S_1 = v_B S_1 \left(1 + \frac{R_B}{h_1} \gamma^2 \right). \quad (16)$$

Выразим из выражения (16) критический угол:

$$\gamma = \sqrt{\frac{h_1}{R_B} \left(\frac{V_c}{v_B S_1} - 1 \right)}. \quad (17)$$

Из расчётной схемы (Рисунок 3) видно:

$$\sin \gamma = \frac{z_\gamma}{R_B}, \quad (18)$$

где z_γ — координата критического сечения по вершине калибра.

Поскольку синус малого угла приблизительно равен самому углу, то приравняв правые части выражений (17) и (18), получим выражение связывающее скорость металла трубы в очаге деформации и угловую скорость вала.

$$\frac{z_\gamma}{R_B} = \sqrt{\frac{h_1}{R_B} \left(\frac{V_c}{v_z S_1} - 1 \right)}. \quad (19)$$

Для решения уравнения (19) воспользуемся методом Брента. Метод Брента или алгоритм последовательного перебора Брента, - это алгоритм одномерного поиска, который является комбинацией метода золотого сечения и квадратичной интерполяции. В уравнении (19) две неизвестных: секундный объём (V_c) и продольная координата нейтрального сечения при вершине калибра (z_γ). Поскольку при решении уравнения энергетического баланса методом Брента значение V_c на каждой итерации задано, то решение уравнения (19) не представляет сложности.

Запишем выражение для определения непосредственно угловой скорости валка из условия равенства проекций скоростей поверхности трубы и валка при вершине калибра на ось OZ :

$$\omega = \frac{v_z}{\sqrt{R_B^2 - z_\gamma^2}}. \quad (20)$$

Таким образом, обобщенное уравнение энергетического баланса сводится к уравнению с одной неизвестной — V_c . Для его решения также был применён метод Брента.

Для обеспечения возможности оперативного расчёта скоростных режимов на основе разработанной математической модели был создан программный продукт. При этом для обеспечения максимальной универсальности структура программы была реализована в виде отдельных подпрограмм, что позволило легко адаптировать её для различных непрерывных станов.

Разработанный программный продукт использовали для исследования процесса непрерывной прокатки, в частности, определяли коэффициенты межклетевых натяжений для различных скоростных режимов. Для этого при заданной калибровке валков и режиме обжаты подбирали значения коэффициентов межклетевого натяжения так, чтобы получаемый в результате расчёта скоростной режим совпадал со скоростным режимом установленным на стане. Таким образом, были проанализированы скоростные режимы для всего сортамента труб производимых на ТПА с непрерывным станом (восемь двухвалковых клетей, плавающая оправка), установленным на заводе компании IPSCO Koppel Tubulars (г. Эмбридж, США) (Рисунок 5), а также скоростные режимы ТПА 159-426 (семь двухвалковых клетей, удерживаемая оправка) АО «Волжский трубный завод».

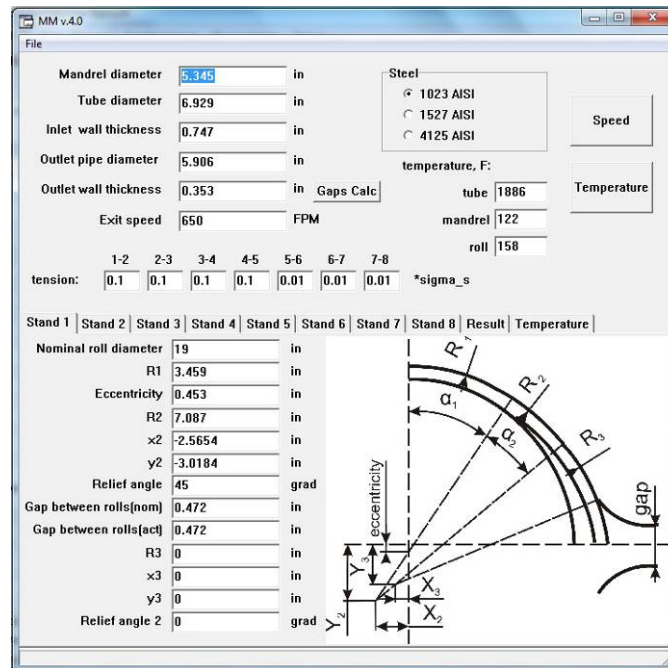


Рисунок 5 - Интерфейс программы для расчёта скоростных режимов непрерывного стана

Третья глава посвящена физическому и компьютерному моделированию процесса раскатки гильзы на плавающей оправке для проверки адекватности созданной математической модели.

Физическое моделирование состояло из двух экспериментов. В рамках первого оценивалось совпадение расчётного и фактического значений коэффициентов вытяжки, в рамках второго — совпадение значений расчётного и фактического секундных объёмов.

Физическое моделирование процесса прокатки труб осуществлялось на лабораторном прокатном стане ЭУ-ПППТ ОАО «РосНИТИ» (Рисунок 6).



Рисунок 6 - Общий вид экспериментальной установки с двухвалковыми клетями 260

Для прокатки использовались свинцовые патрубки диаметром 35,2 мм и с толщиной стенки 5 мм. Прокатка патрубков осуществлялась на плавающих оправках диаметром 23,6 мм и 23,2 мм. При прокатке патрубков зазор между валками для разных проходов выставлялся так, чтобы обеспечить набор

статистических данных для их последующей обработки. После каждого прохода от раската отрезались раздутые передние и задние концы. Площадь поперечного сечения очага деформации раската после каждого прохода рассчитывалась по методу, в основе которого лежит получение растрового изображения высокой чёткости и последующая его обработка на компьютере с использованием программы AxioVision (Таблица 1). Результаты сравнения экспериментальных и расчётных значений коэффициентов вытяжки представлена на рисунке 7.

Таблица 1 - Результаты опытной прокатки

№	Диаметр заготовки, мм	Диаметр оправки, мм	Овальность калибра в первом проходе	Овальность калибра во втором проходе	Коэффициент вытяжки Передний конец/центр	Коэффициент вытяжки средний
1	35,2	23,2	1,2	1,18	1,378371 1,302417	1,340394
2	35,2	23,6	1,2	1,18	1,165634 1,291989	1,228811
3	35,2	23,2	1,25	1,2	1,414879 1,490313	1,452596
4	35,2	23,6	1,25	1,2	1,531845 1,438826	1,485336
5	35,2	23,2	1,3	1,24	1,451861 1,446725	1,449293
6	35,2	23,6	1,3	1,24	1,602319 1,471041	1,53668

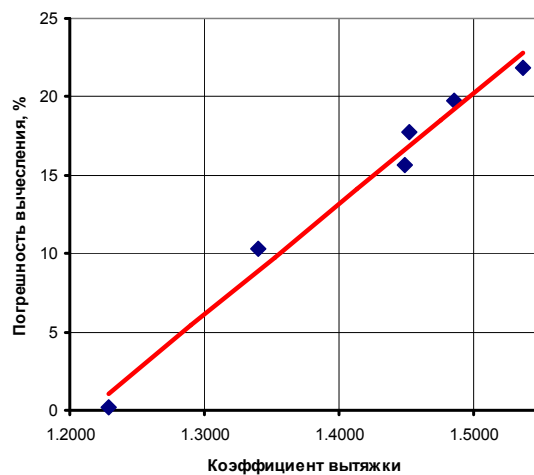


Рисунок 7 - Ошибка расчета коэффициента вытяжки по разработанной методике, в зависимости от реальной величины коэффициента вытяжки

Как видно (Рисунок 7) до значения коэффициента вытяжки равного 1,4, погрешность расчёта по методике не превосходит 15%. Поскольку на практике коэффициент вытяжки обычно не превышает значения равного 1,4, то применяемая в математической модели процесса раскатки труб методика расчета коэффициентов вытяжки обеспечивает достаточную точность расчёта.

Для экспериментального определения величины секундного объёма использовались свинцовые патрубки диаметром 37,0 мм с толщиной стенки 4,0 мм и оправки диаметром 25,7 мм и 26,5 мм. Прокатка велась на оправках с предварительно нанесённой графитовой смазкой и на оправках без смазки. Для определения коэффициента трения применялась машина трения (Рисунок 8).

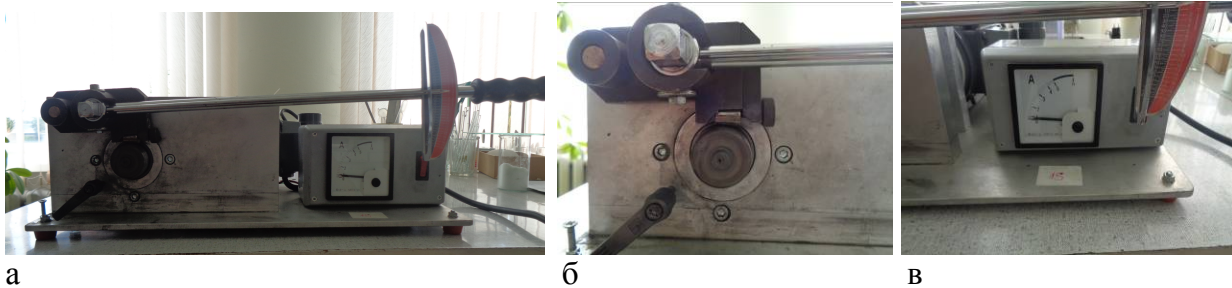


Рисунок 8 — Машина трения. а — общий вид; б — узел контакта стационарного ролика из стали и сменного ролика из свинца; в — амперметр и шкала измерения момента прижатия.

Для определения величины коэффициента опережения применялся метод керновых отпечатков. На поверхность валка были нанесены риски. Расстояние между рисками по реборде составляло 50 мм. После прокатки измерялось расстояние между отметками на поверхности образца. Коэффициент опережения, вычислялся по формуле:

$$i = \frac{L_1}{L_B} - 1, \quad (21)$$

где L_1 — расстояние между керновыми отпечатками на поверхности прокатанного образца;

L_B — расстояние между керновыми отпечатками, нанесенными на поверхность ручья калибра.

Затем, зная коэффициент опережения и скорость вращения валков v_B , определялась скорость v_1 выхода образца из очага деформации:

$$v_1 = v_B(i + 1). \quad (22)$$

Полученные в ходе прокатки образцы распиливались, и площади их поперечных сечений определялись способом аналогичным описанному выше.

Варьируемыми в ходе эксперимента факторами являлись:

- 1 Обжатие образца по вершине калибра ε_B ;
- 2 Коэффициент трения на контакте с оправкой f_0 ;
- 3 Овальность калибра θ .

Коэффициент трения определялся для двух вариантов смазки оправок — без смазки и с графитовой смазкой. Величина коэффициента трения при пластической деформации свинца определялась многократно, поэтому она была определена по литературным данным. Коэффициент трения на контакте внутренней поверхности трубы с оправкой, смазанной графитовой смазкой определялся на машине трения. Значения коэффициентов трения для случаев

прокатки на оправке без смазки и на оправке с нанесённой графитовой смазкой представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Значения коэффициентов трения

Пара трения	Коэффициент трения
Сталь-свинец без смазки	0.305
Сталь-свинец со смазкой	0.196

Значения расчётного и фактического значений секундного объёмов, а также результаты их сравнения приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Сравнение расчётного и фактического значений секундного объёма

№ образца	Средняя площадь поперечного сечения, кв.мм	Среднее значение коэффициента опережения	Скорость течения металла, мм/с	Фактический секунднй объём, куб. мм/с	Расчётный секунднй объём, куб. мм/с	Погрешность, %
1-3	335.51	0.086005	0.065921	22.117326	19.78902	10.5
4-6	315.3767	0.081372	0.065640	20.701418	18.11624	12.5
7-9	293.3233	0.096615	0.066565	19.525236	17.57216	10.0
10-12	312.0733	0.073414	0.065157	20.333840	19.41397	4.5
13-15	343.3533	0.018905	0.061848	21.235879	18.11624	14.7
16-18	359.2367	0.01599	0.061671	22.154693	19.78902	10.7
19-21	346.79	0.03751	0.062977	21.840091	17.57216	19.5
22-24	365.6533	0.038781	0.063054	23.056257	19.41397	15.8

Получение полей скоростей металла в очаге деформации при физическом моделировании затруднено, поэтому для оценки достоверности полученной математической модели, было проведено сравнение с результатами расчета в программе конечно-элементного анализа QForm (Рисунок 9).

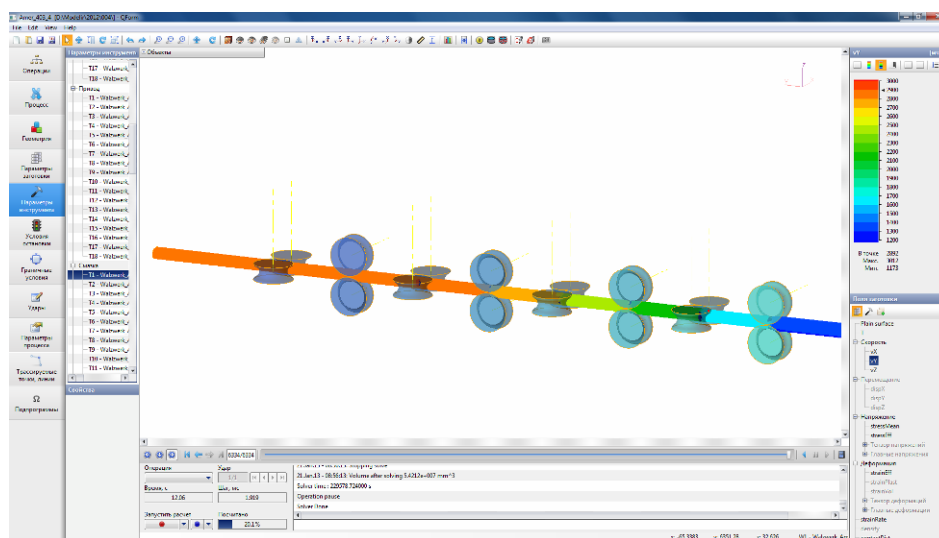


Рисунок 9 - Моделирование процесса раскатки трубы на непрерывном стане в программе QForm

Исходными данными для компьютерной модели, созданной в программе QForm, послужили скоростные режимы и калибровка инструментов, применяемые на заводе в городе Эмбридж, США. Сравнение результатов расчётов коэффициентов вытяжки, проведённых в программе QForm, с результатами, полученными при расчете по разработанной методике показали высокую степень сходимости результатов (Рисунок 10). Максимальная погрешность составила 3%. При этом следует отметить, что время, требуемое программе QForm для расчёта, составляет порядка одной недели, в то время как программе созданной на основе разработанной методики, требуется менее секунды.

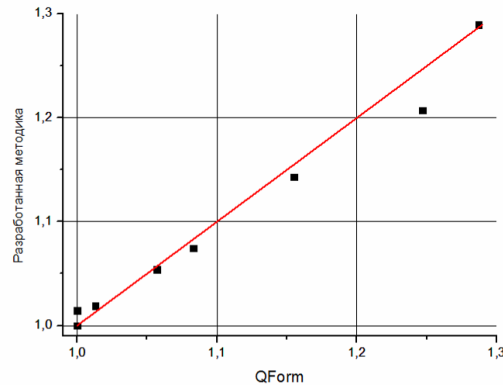


Рисунок 10 - Сравнение расчета коэффициента вытяжки по разработанной методике, с результатом моделирования в QForm

В ходе компьютерного моделирования были получены значения скоростей течения металла в продольном направлении (Рисунок 9). Полученные в результате компьютерного моделирования данные сравнивались с результатами расчёта по разработанной методике (Таблица 4, Рисунок 11).

Таблица 4 — Скорости течения металла в продольном направлении

№ клетки	Скорость (QForm), м/с	Скорость (расчёт), м/с	Погрешность, %
0*	1.35	1.39	2.97
1	1.7	1.71	0.76
2	2.2	2.26	2.52
3	2.45	2.58	5.42
4	2.7	2.82	4.35
5	2.8	2.94	4.87
6	2.85	3.00	5.18
7	2.9	3.05	5.10

* — скорость металла трубы на входе в первую клетку стана

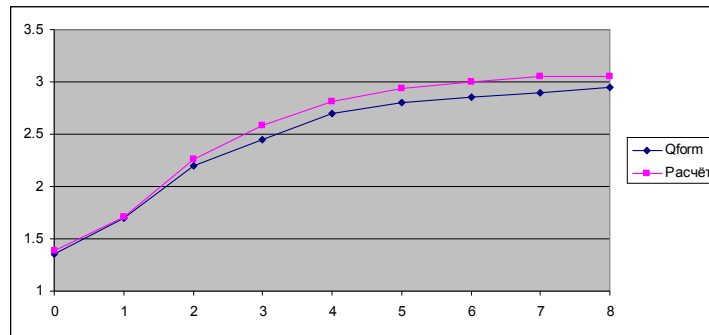


Рисунок 11 — Скорости течения металла в продольном направлении

Как видно (Рисунок 11) значения скоростей металла, полученные в ходе расчёта мало отличаются от скоростей, полученных в ходе моделирования.

На основе сравнения результатов расчёта скоростей металла с результатами компьютерного моделирования можно заключить, что разработанная методика достаточно точна, а принятые при её разработке допущения обоснованы, и не вносят существенного искажения в результаты расчётов.

В четвертой главе представлены результаты исследования процессов формирования толщины стенки труб при непрерывной прокатке на заводе компании IPSCO Koppel Tubulars Inc.

Поскольку точность стенки является результатом воздействия многих факторов, включающих настройки прошивного и непрерывного станов, калибровки и износ прокатного инструмента, неравномерность нагрева и проч., для определения влияния именно прошивного стана на точность труб необходимо провести всесторонний анализ результатов замеров геометрических характеристик.

Для анализа процесса формирования толщины стенки при производстве бесшовных труб были обработаны результаты замеров толщины стенки гильзы после прошивного стана и толщины стенки трубы после непрерывного раскатного стана. Толщина стенки при этом определялась с помощью 9-канального радиоизотопного толщиномера, производства компании IMS Messsysteme GmbH (Германия).

Анализ замеров толщины стенки показал, что в распределении поперечной разностенности прослеживается её циклический характер. Такое распределение разностенности характерно для прошивного стана винтовой прокатки, поскольку непрерывный стан, не способен осуществлять циклическое воздействие на трубу ввиду особенностей ведения процесса. Таким образом можно сказать, что разностенность труб, в данном случае, является «наследственной», сформированной на прошивном стане.

Для оценки уровня наследственной разнотолщинности стенки трубы проведены замеры толщины стенки гильзы после прошивного стана винтовой прокатки с бочковидными валками и неподвижными линейками. Статистический анализ показал, что для гильзы со средней толщиной стенки после прошивки 18,57 мм, среднеквадратичное отклонение составляет 0,36 мм. Таким образом, толщина стенки с вероятностью не менее 99,7% находится в интервале 17,49...19,65 мм, что соответствует $\pm 5,8\%$.

Средняя толщина стенки трубы, прокатанной из этой гильзы на непрерывном стане составляет 8,148 мм со среднеквадратичным отклонением 0,224 мм. Доверительный интервал изменения толщины стенки трубы после непрерывного стана при уровне вероятности 99,7% составит $\pm 0,672$ мм или $\pm 8,2\%$.

Также для сравнения использовали данные измерений для труб со средней толщиной стенки 8,4 мм. Среднеквадратичное отклонение составляет 0,24 мм. А доверительный диапазон изменения толщины стенки составил $\pm 8,6\%$ (диаметр трубы после непрерывного стана 150 мм). Таким образом непрерывный стан увеличивает наведённую в гильзе разнотолщинность стенки и, доверительный интервал изменения толщины стенки значительно увеличивается, с $\pm 5,8\%$ до $\pm 8,6\%$. Следовательно, для повышения точности по толщине стенки труб в первую очередь необходимо повышать точность прокатки на непрерывном стане.

Закономерности формирования размеров труб в непрерывном стане во многом определяются калибровкой валков. В настоящее время существующие методики расчёта калибровки валков позволяют выполнять расчёты общего характера, но в явном виде не дают связь с точностью получаемых труб. В связи с этим возникла необходимость экспериментального определения влияния калибровки валков на точность прокатанных труб.

В процессе опытной прокатки исследовали формоизменение металла в непрерывном стане при прокатке труб с номинальным наружным диаметром 150 мм и номинальными толщинами стенок 7,19 мм, 8,33 мм и 11,56 мм. Для этого сравнивали точность по толщине стенки труб, прокатанных на валках со штатной калибровкой и калибровкой разработанной ОАО «РосНИТИ». При этом контролировалось усилие извлечения оправки.

Результаты опытной прокатки показали, что при производстве труб с номинальной толщиной стенки 8,33 мм и 11,56 мм получены положительные результаты с точки зрения уменьшения поля возможных вариаций значений толщины стенки. На трубах с номинальной толщиной стенки 7,19 мм этого добиться не удалось. Также при прокатке на предложенной калибровке валков не удалось добиться снижения усилия извлечения оправки на всех опробованных типоразмерах труб.

Таким образом, результаты опытной прокатки показали, что несмотря на то, что калибровка валков оказывает существенное влияние на точность геометрических размеров труб, она не всегда позволяет достичь требуемого результата. При прокатке труб разных типоразмеров на непрерывном стане с одной и той же калибровкой валков могут быть получены разные результаты (Рисунок 12)

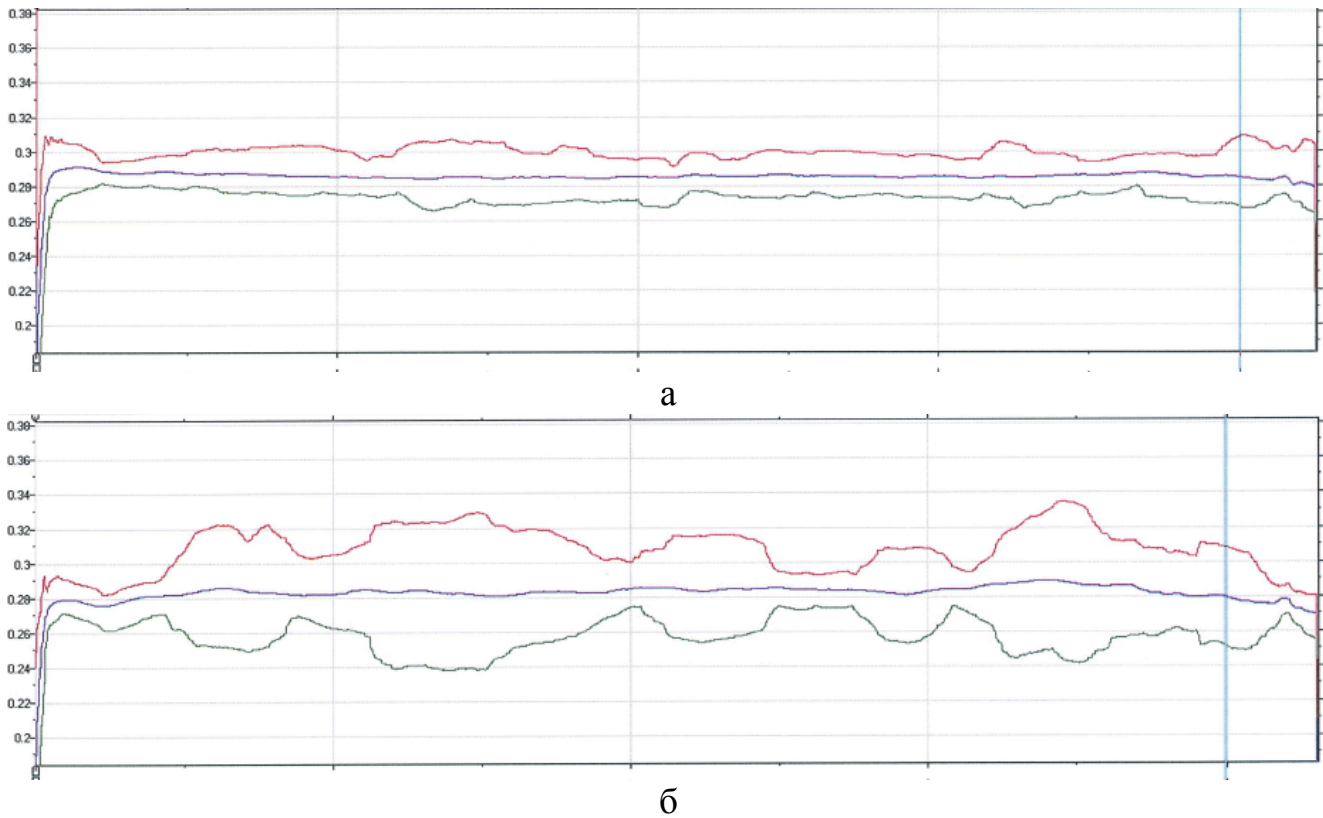


Рисунок 12 — Примеры записи толщины стенки по длине трубы для труб плавки 961А №1(а) и №15 (б), — максимальное значение толщины стенки; — среднее значение толщины стенки; — минимальное значение толщины стенки

Для оценки влияния межклетевых натяжений на геометрию труб, на заводе компании IPSCO Koppel Tubulars была проведена опытная прокатка, в результате которой получены опытные данные о влиянии различных скоростных режимов на разностенность труб [2]. В процессе опытной прокатки проведены исследования для трёх видов труб:

- с толщиной стенки 6,45 мм (0.254") из стали 4125¹;
- с толщиной стенки 7,18 мм (0.283") из стали 1526²;
- с толщиной стенки 10.36 мм (0.408") из стали 1527³.

Согласно действующей калибровке наружный диаметр труб на выходе из непрерывного стана всегда равен 150 мм.

Всего было прокатано по 30 труб с толщиной стенки 6,45 мм и 10.36 мм и 36 труб с толщиной стенки 7,18 мм. При этом трубы каждого вида делились на три равные партии. Первая партия прокатывалась по номинальному скоростному режиму. При прокатке второй партии труб частота вращения валков первой клетки стана увеличивалась на 10%. При прокатке третьей партии труб частота вращения валков первой клетки стана уменьшалась на 5%. При прокатке третьей партии труб

¹ C ≤ 0,23...0,28; Si ≤ 0.2...0.35; Mn ≤ 0.7...0.9; P ≤ 0.04; S ≤ 0.04; Cr 0.4-0.6; Mo 0.2-0.3.

² C ≤ 0,22...0,29; Si ≤ 0.07...0.6; Mn ≤ 1.1...1.4; P ≤ 0.03; S ≤ 0.05.

³ C ≤ 0,22...0,29; Si ≤ 0.07...0.6; Mn ≤ 1.1...1.5; P ≤ 0.03; S ≤ 0.05.

с толщиной стенки 10.36 мм скорость вращения валков первой клетки с начала уменьшили на 4%, а затем, после прокатки трёх труб, уменьшение частоты вращения валков первой клетки составило только 2%, так как при этом возникали сложности с извлечением оправки.

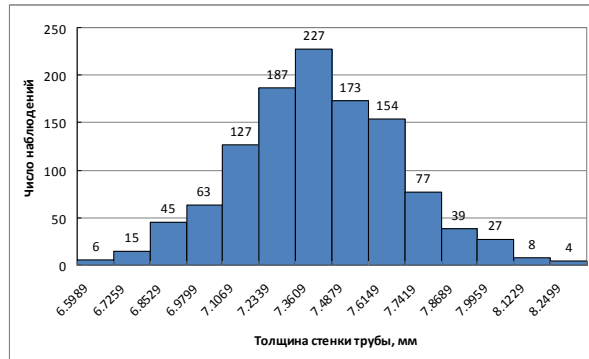
После извлечения оправки трубы проходили через 9-канальный толщиномер фирмы IMS, который измерял на протяжении всей трубы толщину стенки в 9 равноотстоящих точках по периметру поперечного сечения трубы.

По полученным в процессе прокатки результатам сделаны следующие выводы.

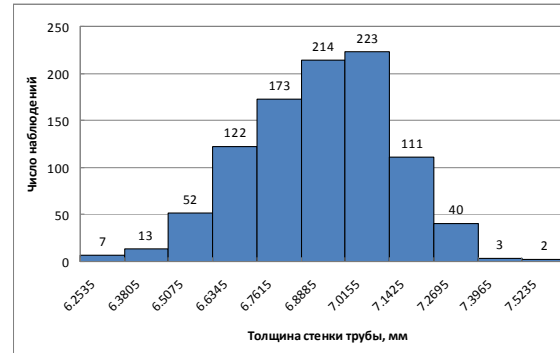
1 При прокатке труб с номинальной толщиной стенки 7,18 мм из стали 1526 с увеличением коэффициента межклетевого натяжения в исследованном диапазоне однозначно увеличивается точность толщины стенки трубы (Рисунок 13, а-б). Доверительный интервал уменьшатся с $\pm 10\%$ до $\pm 8,4\%$.

2 При увеличении прочности металла трубы (сталь 4125 и 1526) характер влияния коэффициента межклетевого натяжения на точность трубы сохраняется. Доверительный интервал уменьшается с $\pm 7,5\%$ до $\pm 5,9\%$ (Рисунок 13, в-г).

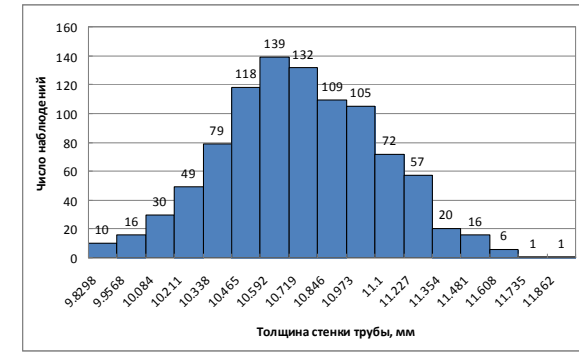
3 При увеличении толщины стенки трубы наблюдается обратная картина – увеличение коэффициента межклетевого натяжения уменьшает точность толщины стенки трубы (Рисунок 13, д-е). Это связано с малой овализацией калибров первых клеток непрерывного стана.



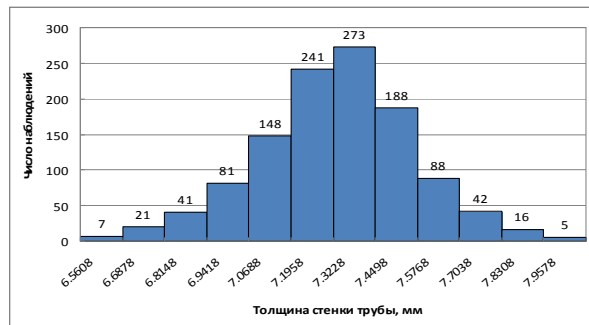
а



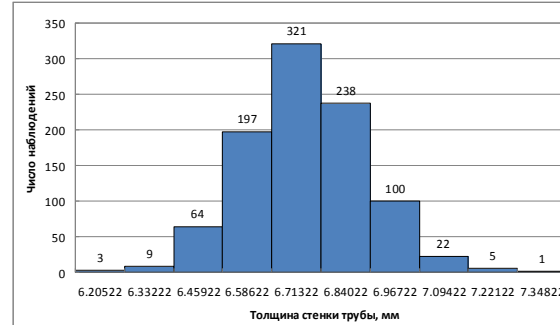
б



в



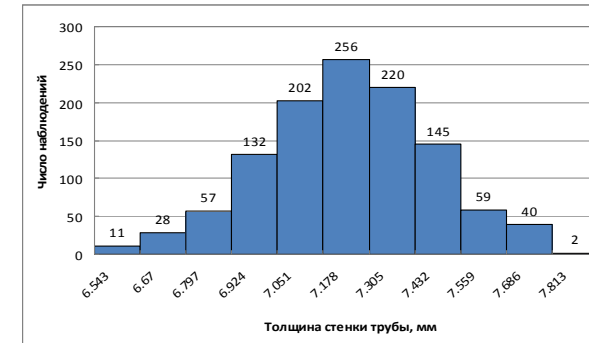
г



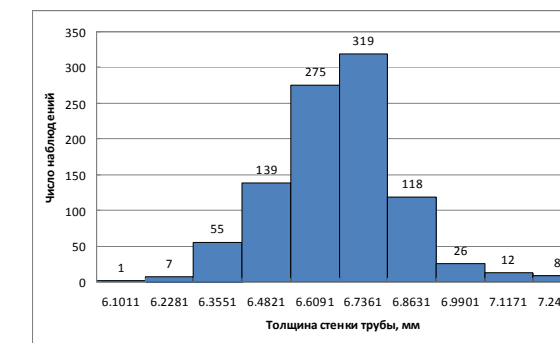
д



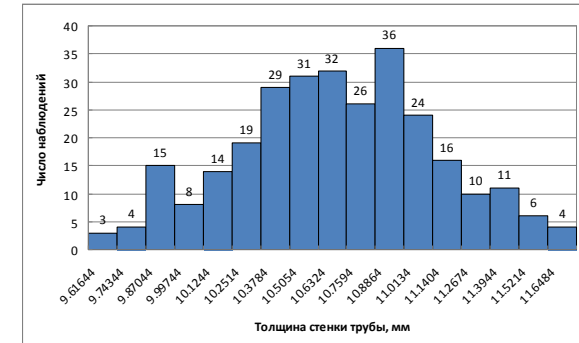
е



ж



з



и

Рисунок 13 — Разброс значений толщин стенки трубы для случая прокатки: а — труба 150×7,18 мм с увеличением скорости первой клетки на 10%; б — труба 150×7,18 мм с номинальным скоростным режимом; в — труба 150×7,18 мм с уменьшением скорости в первой клетке на 5%; г — труба 150×6,45 мм с увеличением скорости первой клетки на 10%; д — труба 150×6,45 мм с номинальным скоростным режимом; е — труба 150×6,45 мм с уменьшением скорости в первой клетке на 5%; ж — труба 150×10,36 мм с увеличением скорости 1-й клетки на 4%; з — труба 150×10,36 мм с номинальным скоростным режимом; и — труба 150×10,36 мм с уменьшением скорости в 1-й клетке на 4%;

Заключение

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

1 Разработана математическая модель процесса раскатки труб в непрерывном стане;

2 Адекватность получаемых при помощи математической модели значений параметров непрерывной прокатки проверена посредством физического и компьютерного моделирования;

3 На основе математической модели разработана методика расчёта скоростных режимов;

4 Разработан программный продукт на основе разработанной методики, его работоспособность проверена при выпуске опытных партий труб;

5 Разработаны технологические решения, направленные на увеличение точности труб;

6 Разработанная математическая модель использована для анализа скоростных режимов непрерывного стана ТПА 159-426 АО «ВТЗ» и непрерывного стана компании IPSCO Koppel Tubulars, установленного в г. Эмбридж (США).

Перспективы дальнейшей разработки выбранной темы исследования заключаются в совершенствовании методики расчёта скоростных режимов посредством учёта таких факторов, как износ валков, степень заполнения калибров, изменения условий трения на контакте прокатываемого металла и инструмента, изменения температуры и механических свойств металла в процессе прокатки, а также расчёта влияния указанных параметров на заполнение и освобождение стана.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

В рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1 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.

2 Выдрин, А.В. Исследование деформационных, кинематических и энергосиловых параметров процесса непрерывной прокатки бесшовных труб / А.В. Выдрин, В.В. Широков // Черные металлы. — 2012. — №2. — С. 13-19.

3 Пьянков, Б.Г. Исследование непрерывной продольной прокатки труб на основе физического и математического моделирования / Б.Г. Пьянков, А.В. Выдрин, В.В. Широков, Е.В. Храмков // Сталь. — 2014. — №6. — С. 67-69.

4 Выдрин, А.В. Исследование деформационных, кинематических и энергосиловых параметров процесса непрерывной прокатки бесшовных труб / А.В. Выдрин, В.В. Широков // Сталь. — 2012. — №2. — С. 13-19.

5 Широков, В.В. Совершенствование методики расчета скоростного режима непрерывной прокатки труб / В. В. Широков, А. В. Выдрин, А. В. Никитин, В. В. Ананян, А. В. Никляев // Черные металлы. — 2016. — №8. — С. 32-36.

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

Vydrin A.V. Speed simulation of continuous pipe rolling / A.V. Vydrin, V.V. Shirokov // *Steel in Translation*. — 2011. — Vol. 41. — P. 140-142.

Другие публикации:

1 Выдрин, А.В. Математическое моделирование кинематических и энергосиловых параметров процессов непрерывной прокатки бесшовных труб / А.В. Выдрин, В.В. Широков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2011. — №6. — С. 29-31.

Vydrin A.V. Mathematical simulation of kinematic and energy-power parameters for the continuous rolling process of seamless pipes / A.V. Vydrin, V.V. Shirokov // *Metallurgical and Mining Industry*. — 2011. — №3. — P. 256-260.

2 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.

В сборниках трудов научных конференций:

1 Выдрин, А.В. Математическое моделирование процесса деформации труб в непрерывном стане и стане-извлекателе при реализации технологии PQF / А.В. Выдрин, В.В. Широков, П.А. Мальцев, А.В. Зинченко // *Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции "ТРУБЫ-2009"*. — 2009. — С. 147-150.

2 Выдрин, А.В. Исследование точности размеров труб, прокатанных на непрерывном стане с плавающей оправкой / А.В. Выдрин, В.В. Широков, И.Н. Черных, М. Хвостал // *Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции "ТРУБЫ-2011"*. — 2012. — №2 — С. 64-67.

3 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"* — 2014. — №2 — С. 95-102.

4 Выдрин, А.В. Исследование непрерывной продольной прокатки труб на основе физического и математического моделирования / А.В. Выдрин, Д.О. Струин, В.В. Широков, А.О. Ашенбрейнер, Е.В. Храмков // *Сборник трудов XX Юбилейной научно-технической конференции "ТРУБЫ-2012"*. — 2013. — №2. — С. 4-8.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1 Программа для ЭВМ «Программный комплекс для расчёта скоростных режимов непрерывного трубопрокатного стана с плавающей оправкой» № 2012613142; заяв. № 2012610671 от 3.02.2012; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 02.04.2012 г. (Широков В.В., Выдрин А.В.)

2 Программа для ЭВМ «Программный комплекс для расчёта межклетевых натяжений в непрерывном трубопрокатном стане» № 2010613824; заяв. № 2010611049 от 23.04.2010; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 10.06.2010 г. (Выдрин А.В., Широков В.В.)

3 Программа для ЭВМ «Программный комплекс для расчёта скоростных режимов непрерывного трубопрокатного стана с удерживаемой оправкой»

№ 2012613141; заяв. № 2012610670 от 3.02.2012; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 02.04.2012 г. (Широков В.В., Выдрин А.В.)