

На правах рукописи



Храмков Евгений Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО
И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА
РЕДУЦИРОВАНИЯ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2017

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

Научный руководитель – Александр Владимирович Выдрин, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Швейкин Владимир Павлович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук» (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург.

Павлов Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»), г. Екатеринбург.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»), г. Магнитогорск.

Защита диссертации состоится «06» сентября 2017 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.01 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»

по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001 (гл. корпус).

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: hramkov@rosniti.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) и в сети Интернет по адресу: <http://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/hramkov-evgeniy-vladimirovich>.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, кандидат
технических наук, доцент



Шабурова Наталия Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последнее время к трубам нефтегазового сортамента предъявляются все более высокие требования, как по точности, так и по механическим свойствам. Достижение указанных требований на строящихся и действующих трубопрокатных и трубопрессовых агрегатах (ТПА) достигается за счет совершенствования технологии на всех переделах. Не последнюю роль в технологической цепочке играет операция редуцирования, так как это окончательная операция горячего передела.

Кроме того, применение редуциционных станов в составе современных высокопроизводительных ТПА позволяет расширить сортамент прокатываемых труб, как по наружному диаметру, так и по толщине стенки. Существенное расширение сортамента труб достигается за счет изменения скоростных и деформационных режимов работы стана, что позволяет вести процесс с межклетевыми натяжениями трубы, которые способствуют повышению точности труб, но в тоже время приводят к увеличению расхода металла по причине образования утолщенных концов.

Однако в существующих теоретических знаниях по процессу редуцирования вопросы, связанные с определением и анализом межклетевых натяжений, освещены недостаточно либо имеют в своей основе эмпирические зависимости, полученные на базе практических данных по работе конкретных промышленных редуциционных станов или лабораторных установок.

Также для обеспечения комплекса механических свойств труб используются различные технологические приемы: дополнительное легирование сталей или особые режимы термической обработки. Наличие редуциционного стана в линии ТПА позволяет сочетать деформацию металла (при определенных степени, скорости и температуре деформации) с термической обработкой, то есть проводить одну из разновидностей термомеханической обработки (ТМО): высокотемпературную (ВТМО). Применение ВТМО снижает затраты по переделу за счет упрощения режимов термической обработки и исключения дополнительного легирования.

Степень разработанности темы исследования

В середине прошлого века редуциционные станы получили широкое развитие, как в отечественном, так и в зарубежном производстве труб. В настоящее время большинство ТПА оснащены редуциционными станами в основном с 2-ух и 3-ех валковыми клетями, работающими с натяжением трубы в межклетевых промежутках. Теоретические основы процесса редуцирования заложены

отечественными учеными: А.А. Шевченко, В.П. Анисифоров, Г.И. Гуляев, В.Н. Выдрин, В.Л. Колмогоров, Г.Я. Гун, Ю.М. Матвеев, Н.Н. Дружинин, А.З. Глейберг, В.А. Юргеленас, П.Н. Ившин и др.

Первые методики расчета технологических параметров процесса редуцирования основываются на эмпирических (полуэмпирических) зависимостях, которые получены авторами, исследовавшими процесс редуцирования до 1960-х годов. Зачастую они не учитывали влияние межклетевого натяжения. Позднее исследователи стали учитывать влияние натяжения, а также толстостенности трубы на изменение толщины стенки и диапазоны применимости формул увеличились. Дальнейшее развитие теории редуцирования труб характеризуется более углубленным и детальным описанием процесса. В связи с развитием электронно-вычислительной техники работы ученых в период с 1970-х годов и по настоящий момент характеризуются освещением не отдельных аспектов технологии редуцирования, а разработкой комплексных математических моделей.

Целью работы является повышение эффективности изготовления горячедеформированных труб на основе физического и математического моделирования процесса редуцирования.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи** исследования:

1. Разработка математической модели процесса редуцирования труб в трехвалковых калибрах, позволяющей проводить научно-обоснованный анализ технологии;

2. Разработка новых научно-обоснованных технических решений, обеспечивающих снижение расхода металла и получение требуемых механических свойств продукции;

3. Проведение в лабораторных условиях экспериментальных исследований с целью проверки теоретических результатов работы и разработанных технических решений;

4. Выполнение промышленного опробования новых технических решений.

Научная новизна:

1. На основе энергетического метода получены новые аналитические зависимости для расчета геометрических и кинематических параметров очага деформации при безопрочной прокатке труб в трехвалковых калибрах, а также для расчета составляющих уравнения энергетического баланса, позволяющие рассчитывать технологические параметры процесса редуцирования труб, в том числе и межклетевые натяжения;

2. Впервые проведено научно-обоснованное исследование влияния различных факторов на межклетевые натяжения трубы, что позволило определить основные параметры, влияющие на точность труб готового размера;

3. На основе экспериментального исследования получено новое выражение для расчета величины коэффициента опережения металла при безоправочной прокатке труб в трехвалковых калибрах от коэффициента трения, обжатия и натяжения;

4. Разработана новая инженерная методика расчета скоростных режимов редуцирования, которая позволяет обеспечить режим межклетевого натяжения труб, уменьшающий длину утолщенных концов более чем на 20 %;

5. Впервые определены параметры осуществления высокотемпературной термомеханической обработки труб из стали марки 20Х13 в линии редуционного стана для обеспечения требуемого уровня механических свойств.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанная математическая модель процесса редуцирования в трехвалковых калибрах и методика расчета технологических параметров на ее основе прошли успешную апробацию на редуционно-растяжном стане АО «ВТЗ».

Разработанный алгоритм расчета технологических параметров процесса редуцирования реализован в программном продукте «ЕХ-Рат», который успешно внедрен в эксплуатацию в АО «ВТЗ».

Математическая модель и созданный на ее основе программный продукт использован специалистами ОАО «РосНИТИ» как инструмент анализа технологических параметров процесса редуцирования на других трубопрокатных агрегатах.

Результаты диссертационной работы, связанные с разработкой режимов осуществления высокотемпературной термомеханической обработки, реализованы в виде рекомендаций в АО «ВТЗ».

Представленные в диссертации исследования использованы в учебном процессе в курсе лекций по дисциплине «Теоретические основы обработки металлов давлением», при подготовке курсовых и дипломных проектов студентами, обучающимися по направлению 22.04.02 «Металлургия» по программе «Обработка металлов давлением», а также в материалах учебного пособия «Технологии и оборудование для изготовления горячепрессованных труб».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса редуцирования труб в трехвалковых калибрах и результаты ее численного исследования;

2. Результаты экспериментального исследования процесса редуцирования труб в трехвалковых калибрах;

3. Результаты экспериментального исследования режимов высокотемпературной термомеханической обработки стали 20Х13;

4. Результаты промышленного опробования разработанных технических решений.

Методы исследований и достоверность полученных результатов

Для исследования процессов продольной безоправочной прокатки труб использовалось компьютерное и математическое моделирование. Проводилось экспериментальное исследование процесса редуцирования и процесса формирования свойств металла в процессе ВТМО. Лабораторные исследования проводились в ОАО «РосНИТИ» на универсальном комплексе оборудования для исследования процессов продольной прокатки труб, опытно-промышленное изготовление труб осуществлялось в условиях трубопрессового агрегата усилием 55 МН с редуционно-растяжным станом АО «ВТЗ».

Математические модели получены на основе фундаментальных принципов энергетической теории прокатки, а также с использованием лицензионной программы QForm 3D, основанной на методе конечных элементов, при этом построение геометрических моделей прокатного инструмента и очагов деформации осуществлялось в лицензионной САД системе трехмерного твердотельного моделирования КОМПАС-3D. Достоверность результатов, получаемых с применением разработанного программного продукта, подтверждена тестовыми расчетами. Численные значения, получаемые с помощью математической модели, не противоречат результатам экспериментальных исследований. Результаты моделирования согласуются с данными опытно-промышленных и лабораторных испытаний на АО «ВТЗ» и ОАО «РосНИТИ».

Апробация работы

Основные результаты исследований опубликованы в ряде научно-технических изданий и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе, международных: 65-ая научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ», г. Челябинск, 2013 г.; IX международный симпозиум по фундаментальным и прикладным проблемам науки, г. Миасс, 2014 г.; XXI Международная научно-практическая конференция «Трубы-2014. Трубная промышленность России. Вектор инноваций», г. Челябинск, 2014 г.; XV международная научно-техническая уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых, г. Екатеринбург, 2014 г.; VI конференция молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий», г. Москва, 2015 г.;

XIX международная конференция «Физика прочности и пластичности материалов», г. Самара, 2015 г.; II Международная научно-практическая конференция «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», г. Магнитогорск, 2016 г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, издано учебное пособие, получен патент на изобретение РФ и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 168 страницах машинописного текста, включающего 57 рисунков, 18 таблиц, список использованных источников из 117 наименований отечественных и зарубежных авторов, 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность тематики исследования и освещена степень ее разработанности, сформулирована цель работы и задачи исследования, перечислены полученные автором результаты, раскрыта их научная новизна и практическая значимость, описаны методы исследования и подтверждена достоверность полученных результатов.

В первой главе на основе обзора научно-технической литературы представлены особенности процесса редуцирования бесшовных труб, в частности при изготовлении труб из сталей типа 13Cr, а также информация, касающаяся высокотемпературной термомеханической обработки сталей.

Производство насосно-компрессорных труб из стали типа 13Cr в соответствии с предъявляемыми требованиями является актуальной задачей. Обзор применяемых схем изготовления данной продукции позволил определить наиболее рациональную технологическую структуру производства труб, включающую методы горячего прессования и редуцирования.

При этом в связи с высокой конкуренцией на рынке, необходимо уменьшать себестоимость производства этих труб при прочих равных условиях. Одним из путей снижения себестоимости является снижение расхода металла, а именно, уменьшение длины утолщенных концов при редуцировании. Анализ особенностей процесса редуцирования показал, что наибольшее влияние на процесс образования утолщенных концов оказывает межклетевое натяжение

трубы, расстояние между клетями и распределение межклетевых натяжений по клетям.

Анализ теоретической базы по редуцированию не выявил корректных методик по определению значений межклетевых натяжений. Наличие такой методики позволит определить рациональный скоростной режим редуцирования, позволяющий уменьшить длину отрезаемых концов.

Другой путь уменьшения себестоимости продукции – это использование стали марки 20Х13, то есть стали типа 13Сг без дополнительного легирования никелем. Однако при этом данная сталь не обеспечивает требования, предъявляемые к ударной вязкости. Анализ способов повышения физико-механических свойств показал, что достичь требуемых характеристик можно за счет применения ВТМО. Особенности осуществления высокотемпературной термомеханической обработки соответствует процесс редуцирования. Помимо улучшения характеристик стали ВТМО позволит исключить операцию закалки как отдельный процесс, что также положительно скажется на себестоимости труб.

Во второй главе представлены теоретические исследования процесса безоправочной прокатки труб.

Выполнено математическое описание процесса деформации труб при прокатке на непрерывном безоправочном стане, которое включает: описание геометрии очага деформации; описание кинематики процесса; определение составляющих энергетического баланса процесса. Разработана математическая модель процесса редуцирования труб на трехвалковом непрерывном стане.

Для анализа геометрии очага деформации принята цилиндрическая система координат (ρ, φ, z) (рисунок 1).

Для описания поверхности вала, участвующей в деформации заготовки, рассмотрена произвольная точка контактной поверхности очага деформации, для которой получено уравнение поверхности вала в цилиндрических координатах:

$$R_{iz} = \sqrt{\left(\sqrt{R_{ki}^2 - e_i^2 \cos^2 \varphi} \cos \varphi - \frac{e}{2} \sin 2\varphi \right)^2 + \left(R_{ид} - \sqrt{\left(R_{ид} - \sqrt{R_{ki}^2 - e_i^2 \cos^2 \varphi} \sin \varphi + e_i \sin^2 \varphi \right)^2 - z^2} \right)^2}, \quad (1)$$

где R_{iz} – полярная координата поверхности вала в очаге деформации, мм; R_{ki} – радиус калибра, мм; e – эксцентриситет калибра, мм; $R_{ид}$ – идеальный радиус вала, мм; φ, z – координаты в цилиндрической системе координат.

Решение уравнения (1) относительно z позволяет определить поверхность контакта трубной заготовки и поверхности валков при допущении отсутствия

внеконтактной деформации (по причине малой величины деформации в клети редуционного стана). Так получено выражение для определения длины очага деформации l :

$$l_i = \sqrt{\left(R_{идк} + e_i - \sqrt{R_{ки}^2 - R_{i-1}^2 \cos^2 \varphi}\right)^2 - \left(R_{идк} - R_{i-1} \sin \varphi\right)^2}, \quad (2)$$

где R_{i-1} – радиус трубы на входе в очаг деформации, мм.

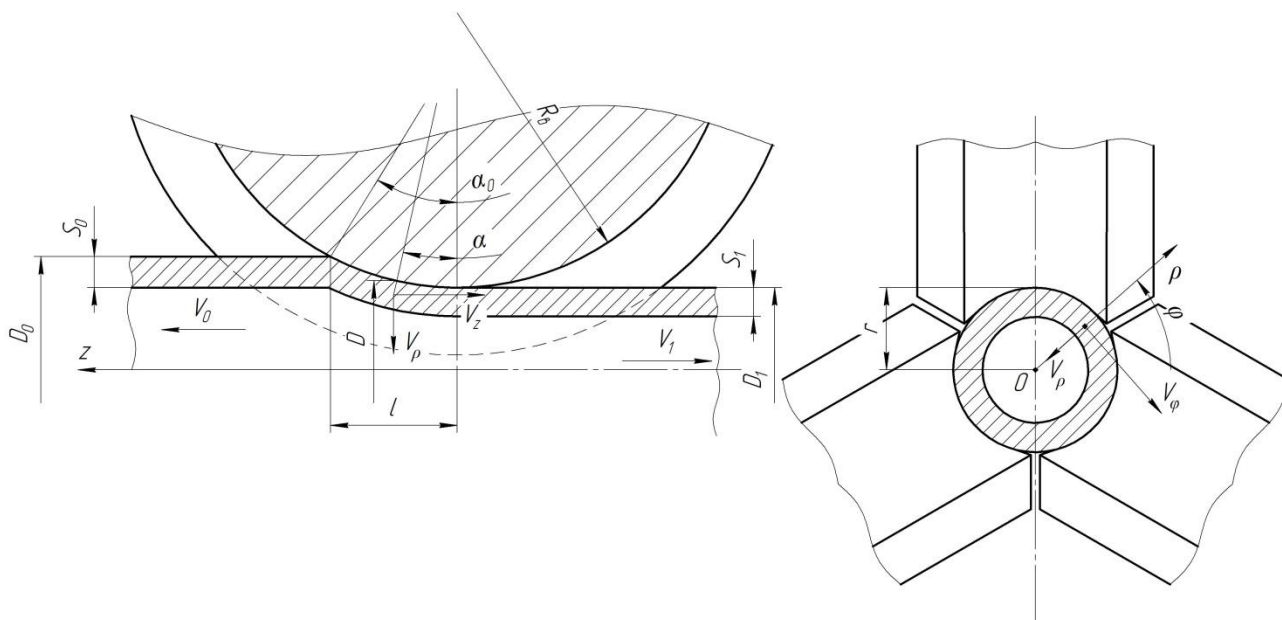


Рисунок 1 – Схема очага деформации

Данную математическую модель сравнивали с результатами твердотельного моделирования в лицензионной САД системе трехмерного проектирования КОМПАС-3D. Сравнение показало достоверность полученных зависимостей для определения геометрических параметров очага деформации (погрешность менее 0,2 %)

Для описания кинематики процесса вектор скорости в цилиндрической системе координат может быть представлен в виде: $\vec{v} = \{v_z, v_\rho, v_\varphi\}$ (рисунок 1).

Принято, что компонента вектора скорости v_z является функцией координаты z . С учетом того, что границей продольного сечения очага деформации, соответствующей контактной поверхности, является дуга окружности, то есть квадратичная функция, получено:

$$v_z = \lambda v_0 - \frac{v_0}{l^2} (\lambda - 1) z^2, \quad (3)$$

где v_0 – скорость трубы на входе в очаг деформацию, мм/с; λ – коэффициент вытяжки.

Ввиду рассмотрения прокатки тонкостенных труб принято, что закон распределения v_ρ близок к линейному, и определены скорости наружной и

внутренней поверхностей трубной заготовки в радиальном направлении. Окончательно для определения v_ρ получено:

$$v_\rho = \left[\frac{\pi n \sin \varphi}{30} \left(\frac{r}{s} - 1 \right) - \frac{\Delta r_{\text{BH}} r}{t_l s} - \left(\frac{\pi n \sin \varphi}{30 s} - \frac{\Delta r_{\text{BH}}}{t_l s} \right) \rho \right] z, \quad (4)$$

где n – частота вращения валков, об/мин; r, s – наружный радиус и толщина стенки трубы в рассматриваемом сечении очага деформации, мм; t_l – время прохождения точки, принадлежащей заготовке, очага деформации равно:

$$t_l = \frac{2l}{v_0(1 + \lambda)}; \quad (5)$$

Δr_{BH} – радиальное перемещение точки, принадлежащей внутренней поверхности заготовки, мм.

Поскольку изменение внутреннего радиуса трубы зависит от абсолютного обжатия и изменения толщины стенки трубы, то при рассмотрении прокатки тонкостенных труб с натяжением в первом приближении можно принимать, что Δr_{BH} равно абсолютному обжатию по наружному радиусу трубы, так как изменение толщины стенки в одной клетки незначительно.

Для определения компоненты вектора скорости v_φ использовано условие несжимаемости: $\xi_{\rho\rho} + \xi_{\varphi\varphi} + \xi_{zz} = 0$, где ξ_{ij} – компоненты тензора скорости деформации. Отсюда получено уравнение для определения v_φ :

$$v_\varphi = \left[\frac{\pi n}{30 s} \left(2 - \frac{r - s}{\rho} \right) + \frac{2 \Delta r_{\text{BH}}}{t_l s} \left(\frac{r}{\rho} - 2 \right) + \frac{2 v_0 (\lambda - 1)}{l^2} \right] \rho z \left(\varphi - \frac{\pi}{6} \right). \quad (6)$$

Уравнения для определения скоростей металла (3), (4) и (6) позволяют найти компоненты тензора скоростей деформации для трехвалкового калибра и интенсивность скоростей деформации сдвига в частности:

$$H = \sqrt{\frac{4}{3} (B^2 + C^2 + BC) z^2 + (A + B\rho)^2}, \quad (7)$$

где приняты следующие обозначения:

$$\frac{\pi n}{30} \left(\frac{r}{s} - 1 \right) - \frac{2 \Delta r_{\text{BH}} r}{t_l s} = A; \quad \frac{2 \Delta r_{\text{BH}}}{t_l s} - \frac{\pi n}{30 s} = B; \quad 2 \frac{v_0}{l^2} (\lambda - 1) = C. \quad (8)$$

Согласно фундаментальным принципам энергетической теории при протекании любых процессов должен соблюдаться закон сохранения и превращения энергии. Применительно к процессу безоправочной прокатки труб этот закон удобно применять в форме уравнения баланса мощностей, согласно которому сумма мощностей всех внешних и внутренних сил должна быть равна нулю:

$$N_B - N_{\text{BH}} - N_0 - N_{\text{cp}} + N_1 - N_\tau = 0, \quad (9)$$

где N_B – мощность сил трения, подводимая валками в очаг деформации; N_{BH} – мощность внутренних сил, расходуемая на процесс деформации;

N_0 , N_1 – мощность сил заднего и переднего натяжения; N_{cp} – мощность сил среза; N_τ – мощность сил трения скольжения на контактных поверхностях в очаге деформации.

Так как рассматривается случай прокатки тонкостенных труб принято допущение, что элементарный объем металла равен:

$$dV = \rho d\rho d\varphi dz = r_{cp} s_{cp} d\varphi dz, \quad (10)$$

где r_{cp} , s_{cp} – средние значения радиуса и толщины стенки трубы, мм.

С учетом зависимости для определения интенсивности скорости деформации (7) получено выражения для аналитического определения N_{BH} :

$$N_{BH} = \frac{r_{cp} \tau_{sc} \pi s_{cp}}{\sqrt{a_1}} \left\{ \frac{\left(\sqrt{a_1 l^2 + a_2} + l \sqrt{a_1} \right)^4 - a_2^2}{4 \left(\sqrt{a_1 l^2 + a_2} + l \sqrt{a_1} \right)^2} + a_2 \ln \left(\sqrt{\frac{a_1}{a_2} l^2 + 1} + l \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \right) \right\}, \quad (11)$$

где выполнена замена:

$$\frac{4}{3} (B^2 + C^2 + BC) = a_1; \quad (A + Br_{cp})^2 = a_2, \quad (12)$$

τ_{sc} – усредненное по объему очага деформации значение сопротивления металла пластической деформации сдвига, МПа.

Мощности N_0 , N_1 , N_{cp} и N_τ являются мощностями на граничных поверхностях очага деформации. Поскольку при безоправочной прокатке труб на внутренней поверхности происходит свободное формоизменение деформируемого металла, поверхностные силы на ней отсутствуют.

Мощности переднего и заднего натяжения определены как:

$$N_0 = \iint_{F_0} \sigma_0 v_0 dS = \sigma_0 v_0 F_0, \quad N_1 = \iint_{F_1} \sigma_1 v_1 dS = \sigma_1 v_1 F_1. \quad (13)$$

где σ_0 , σ_1 – напряжения заднего и переднего натяжения; F_0 , F_1 – площади поперечных сечений трубы на входе и выходе очага деформации.

Для мощности сил среза с учетом замены

$$[(2B + C)r_{cp} + A]^2 = b_2; \quad (14)$$

получено:

$$N_{cp} = 3\tau_{s0} l r_{cp} s_{cp} \left\{ \frac{a_2}{\sqrt{b_2}} \ln \left[\sqrt{1 + \frac{b_2}{a_2} \left(\frac{\pi}{3} \right)^2} + \frac{\pi}{3} \sqrt{\frac{b_2}{a_2}} \right] + \frac{\pi}{3} \sqrt{a_2 + b_2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2} \right\}. \quad (15)$$

Мощность поверхностных сил на поверхности контакта металла трубной заготовки с валками определяется мощностью сил трения скольжения по следующим выражениям

$$N_{\tau\varphi} = -\frac{K_{\varphi}\pi}{36} \left[\left(R_{ид} - \frac{\sqrt{3}}{2} r_0 \right)^2 - \left(R_{ид} + e - \sqrt{R_k^2 - \frac{1}{4} r_0^2} \right)^2 \right]; \quad (16)$$

$$N_{\tau\pi}^{оп} = \tau_{zs} v_0 r_{cp} l (2\lambda + 1) \left(\varphi_{вх} + \varphi_{вых} - \frac{\pi}{3} \right);$$

$$N_{\tau\pi}^{от} = \tau_{zs} v_0 r_{cp} l (2\lambda + 1) (\pi - \varphi_{вх} - \varphi_{вых}),$$

где

$$K_{\varphi} = 6\tau_{\varphi c} r_{cp}^2 \left[\frac{\pi n}{30s_{cp}} \left(2 - \frac{r_{cp} - s_{cp}}{r_{cp}} \right) - \frac{2\Delta r_{вн}}{t_l l s_{cp}} + \frac{2v_0(\lambda - 1)}{l^2} \right];$$

$N_{\tau z}^{оп}$, $N_{\tau z}^{от}$ – мощности сил трения в зоне опережения и отставания соответственно; $\varphi_{вх}$, $\varphi_{вых}$ – угловые координаты нейтральной линии на входе и выходе очага деформации, рад.

Анализ выражения (3) позволил получить характерный вид нейтральной линии по всей контактной поверхности при редуцировании труб в трехвалковом калибре (рисунок 2).

Для определения $\varphi_{вх}$ и $\varphi_{вых}$ получены зависимости:

$$\varphi_{вых} = \arctg \frac{R_{ид} - R_{в}}{\sqrt{R_k^2 - (R_{ид} - R_{в} + e)^2}}; \quad (17)$$

$$\varphi_{вх} = \arcsin \left(\frac{R_{ид}}{r_0} - \frac{30v_0}{\pi n r_0} \right).$$

С учетом закона постоянства секундных объемов решение уравнения энергетического баланса для всего стана позволяет определить скорость течения металла на выходе из последней клетки. Последующее решение уравнения (9) последовательно для каждой клетки позволяет определить величины межклетевых натяжений.

С целью определения энергосиловых параметров процесса решено уравнение равновесия сил в очаге деформации (рисунок 3). В частности, при установленных величинах натяжений трубы (из уравнения энергетического баланса) получено выражение для расчета контактного давления p , МПа:

$$p = \frac{\sigma_1 F_1 - \sigma_0 F_0 + 3(S_{от} - S_{оп})\tau_{zs} \cos \alpha}{3S_k \sin \alpha}. \quad (18)$$

где $S_{от}$, $S_{оп}$ – площади зон отставания и опережения соответственно, мм²; S_k – площадь контактной поверхности, мм²; α – угол захвата, рад.

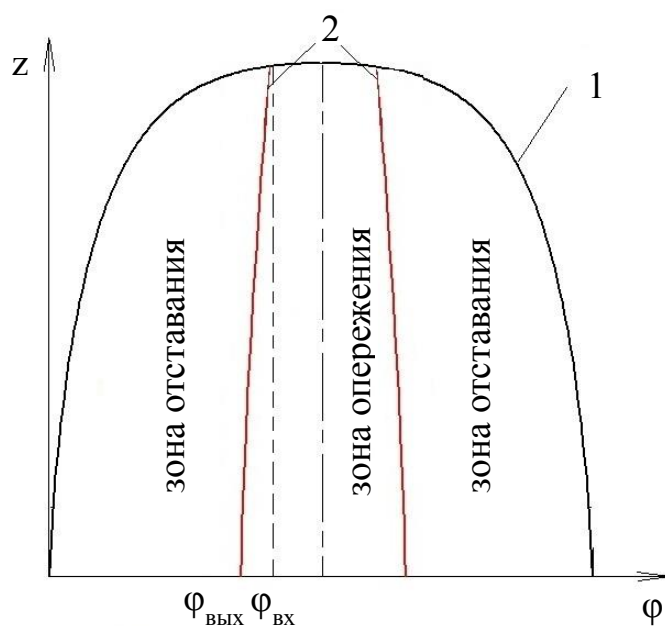


Рисунок 2 – Поверхность контакта металла с валком: 1 – граница очага деформации; 2 – нейтральная линия

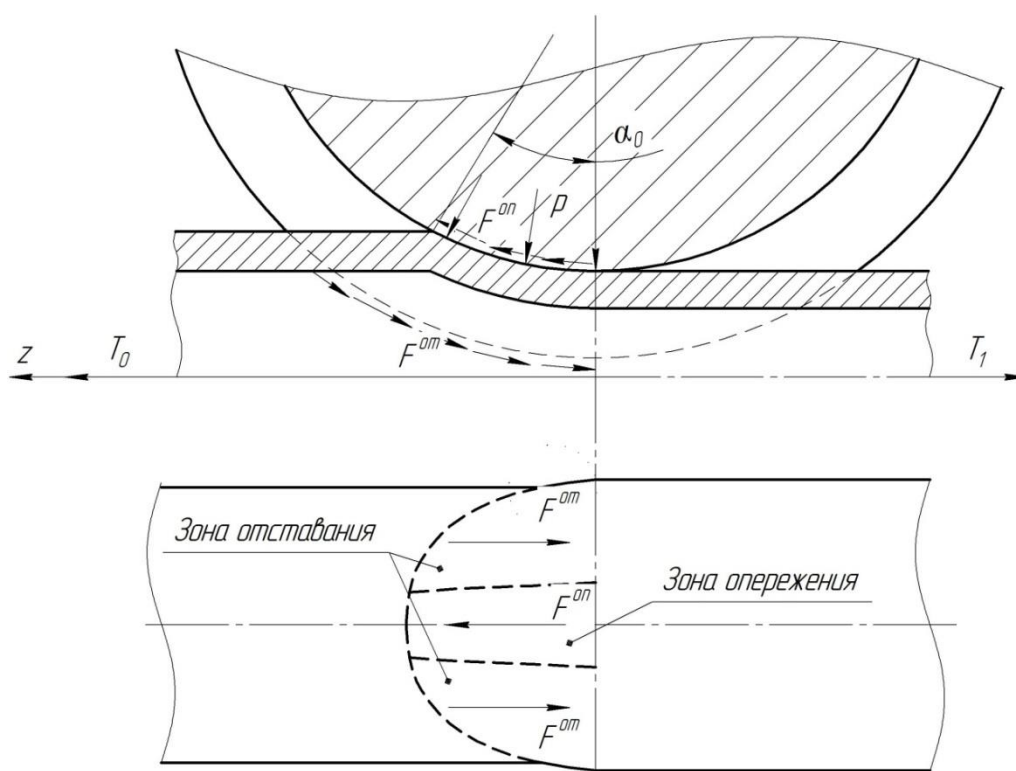


Рисунок 3 – Схема действующих сил в очаге деформации

Проведено численное исследование процесса редуцирования с использованием разработанной математической модели для случаев прокатки в одной клетке, на основании которого получена зависимость скорости течения металла

на выходе из клетки от величины обжатия, что позволяет оценить степень влияния контактного взаимодействия на протекание процесса редуцирования.

Проведен анализ влияния температуры нагрева, свойств деформируемого материала и исходных размеров трубы-заготовки на распределение межклетевых натяжений, а также на энергосиловые и температурные параметры процесса.

Для оценки работоспособности разработанной математической модели определены межклетевые натяжения σ_i/σ_s при редуцировании труб наружным диаметром 73 мм и толщиной стенки 5,5 мм при различных технологических параметрах (рисунок 4).

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований деформационных процессов и процесса формирования свойств стали марки 20X13.

Для расчета мощности сил трения скольжения в очаге деформации определен коэффициент трения методом С.И. Губкина для стали марки 20X13 на установке Gleeble 3800 для диапазона температур от 850 до 1000 °С:

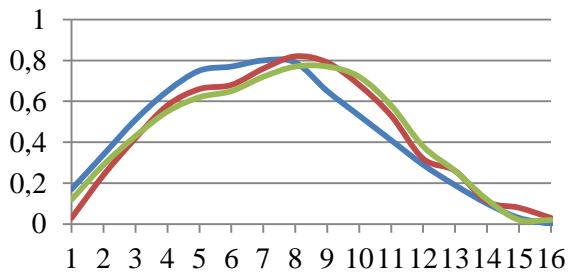
$$f = 0,1545e^{0,001T}, \quad (19)$$

где f – коэффициент трения; T – температура деформации, °С. При этом условия контактного взаимодействия соответствовали условиям протекания процесса редуцирования: шероховатость рабочей поверхности инструмента 3,2 мкм, смазочный материал отсутствовал, температура инструмента – комнатная.

Для подтверждения достоверности расчета кинематических параметров с использованием разработанной математической модели проведено физическое моделирование процесса редуцирования труб в трехвалковом калибре на лабораторной установке ОАО «РосНИТИ» при различных величинах коэффициента трения, обжатия ε и переднего натяжения $z = \sigma_n/\sigma_s$. Среднее значение расхождения результатов экспериментального (точки на рисунке 5) и теоретического (кривые на рисунке 5) исследований составило 4,5 %, а максимальное значение – 7 %, что говорит об адекватности работы математической модели. Анализ кинематики проводился с использованием коэффициента опережения, равного отношению скорости металла к линейной скорости вала по вершине калибра, для которого получено уравнение регрессии:

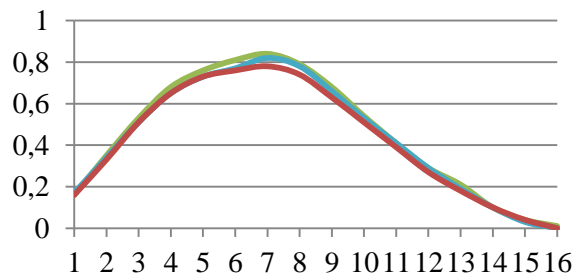
$$i = -0,006 + 0,051f + 0,15\varepsilon - 0,008z + 0,323f\varepsilon + 1,028\varepsilon z + 0,007zf. \quad (20)$$

Погрешность рассчитанных значений по уравнениям регрессии не превышает 3 %



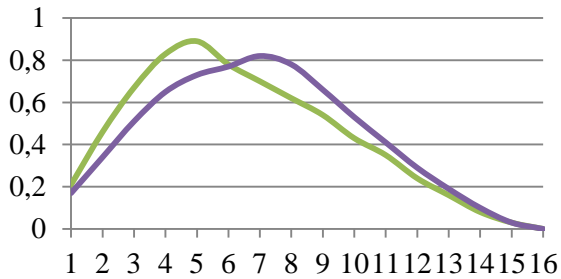
Скоростной режим: — I — II — III

(а)



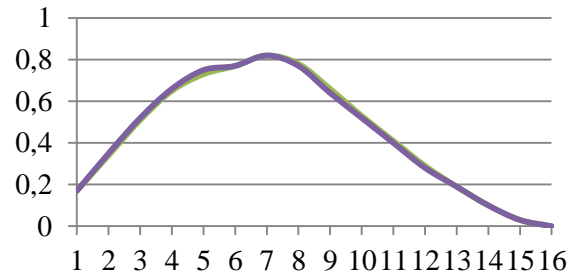
Толщина стенки, мм: — 5 — 6 — 7

(б)



Коэффициент трения: — 0,3 — 0,4

(в)



Марка стали: — 20X13 — сталь 10

(г)

Рисунок 4 – Распределение межклетевых натяжений σ_i/σ_s по клетям стана при варьировании технологических параметров: (а) – скоростной режим, рассчитанный по методике: I – В.П. Анисифорова, II – А.А. Шевченко и В.А. Юргеленаса, III – Г.И. Гуляева и П.Н. Ившина; (б) – исходная толщина стенки; (в) – коэффициент трения; (г) – марка стали

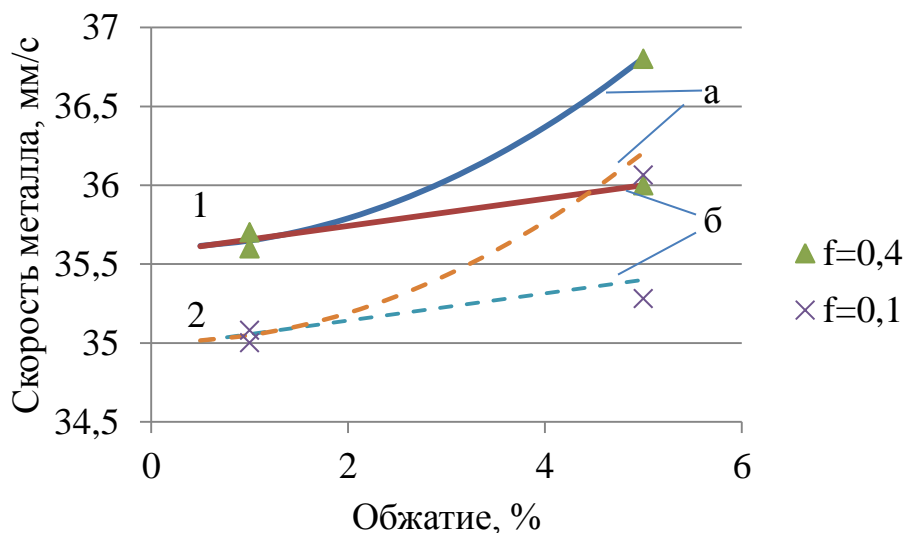


Рисунок 5 – Зависимость скорости течения металла от величины обжатия по наружному диаметру при коэффициенте трения 0,4 (кривая 1) и 0,1 (кривая 2) с натяжением (а) и без натяжения (б)

Проведены исследования по определению сопротивления деформации стали 20Х13 на установке Gleeble 3800 в соответствии с технологическими параметрами редуционного стана ТПЦ-2 АО «ВТЗ» (рисунок 6).

Оценка структуры стали после деформации показала, что вплоть до шестнадцатого нагружения признаки рекристаллизации как статической, так и динамической, не наблюдаются: в деформированных образцах аустенитные зерна вытянуты в поперечном направлении плоскости деформации (рисунок 7).

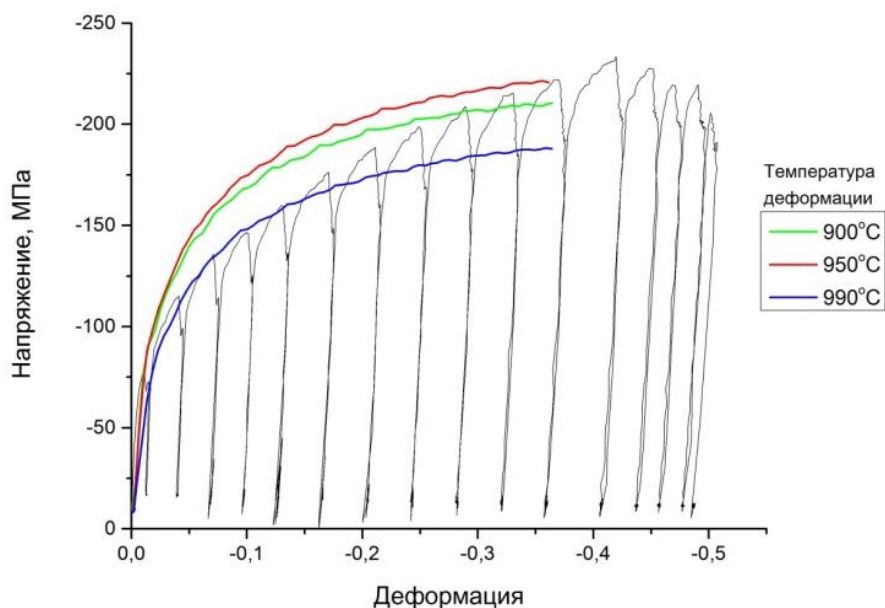


Рисунок 6 – Зависимость напряжений стали 20Х13 от степени деформации при различных температурах

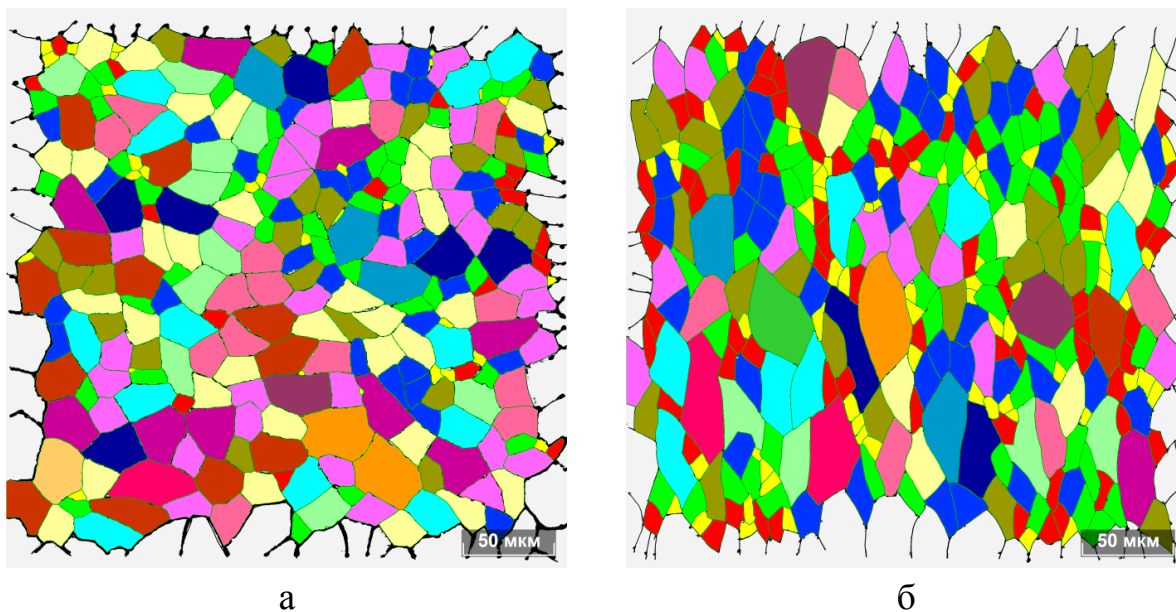


Рисунок 7 – Микроструктура отобранных образцов: а – исходный; б – после 16-го нагружения

Отсутствие рекристаллизации подтверждает возможность использования ВТМО, осуществляемой на РРС, для улучшения комплекса свойств труб из стали 20Х13 в хладостойком исполнении. ВТМО, включающая деформацию при температурах от 850 до 1000 °С с суммарным обжатием более 38 %, обеспечивает небольшое повышение прочностных свойств стали 20Х13 при одновременном увеличении ударной вязкости как при температуре + 20 °С, так и при температуре – 60 °С. Наибольшее упрочнение стали происходит при снижении температуры деформации до 850 °С (таблица 1). Наиболее благоприятный уровень свойств термомеханически упрочненной стали достигается при отпуске с температурой нагрева 760 °С.

Таблица 1 – Механические свойства стали 20Х13 при отпуске 760°С

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	KCV 20°С	KCV –60°С
	МПа		%		Дж/см ²	
Закалка от 1000°С	540	748	24	64	177	51
ВТМО с деформацией при 1000°С	589	769	22	65	197	56
ВТМО с деформацией при 950°С	598	772	24	65	201	60
ВТМО с деформацией при 900°С	577	745	24	67	209	73
ВТМО с деформацией при 850°С	604	776	22	63	200	61

Исследована возможность применения при ВТМО водовоздушного спрейерного охлаждения горячедеформированного металла. При проведении лабораторных экспериментов (деформация осуществлялась при температуре 900 °С) получены следующие данные: $\sigma_{0,2}=573$ МПа; $\sigma_B=752$ МПа; $\delta=24$ %; $\psi=65$ %; $KCV_{+20}=206$ Дж/см²; $KCV_{-60}=74$ Дж/см². Они свидетельствуют о том, что такой вид охлаждения может обеспечить благоприятный уровень свойств при ВТМО. Сделана попытка проведения охлаждения после ВТМО на воздухе, но в этом случае получены не удовлетворительные результаты ударной вязкости, определяемой при температуре – 60 °С.

Предложены режимы ВТМО применительно к редуционно-растяжному стану для изготовления труб из стали 20Х13 группы прочности L80 в хладостойком исполнении в соответствии с ТУ 14-ЗР-114-2011 в условиях АО «ВТЗ».

Показано, что ВТМО не только повышает ударную вязкость стали при отрицательных температурах, но и подавляет развитие интеркристаллитных хрупких трещин (рисунок 8).

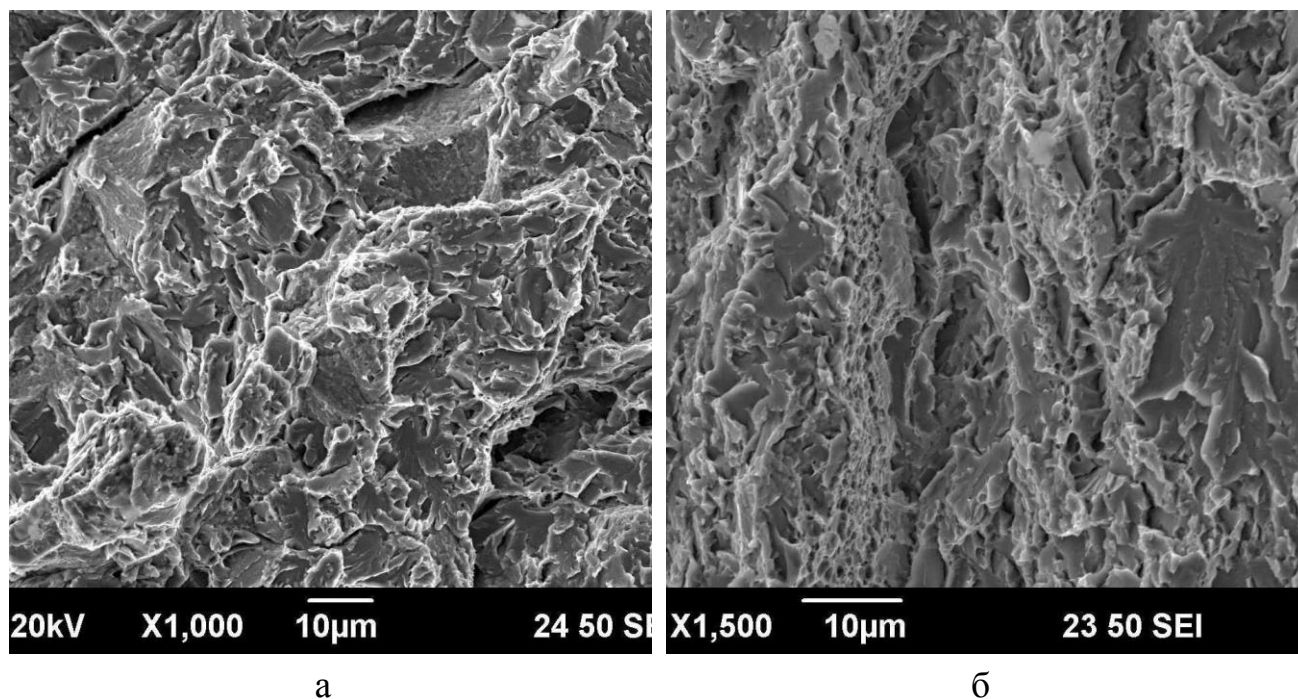


Рисунок 8 – Характерный вид изломов ударных образцов, подвергнутых закалке от 1000 °С (а) и ВТМО при температуре деформации 900 °С (б). Испытания при температуре – 60 °С

В четвертой главе представлена информация, касающаяся апробации и внедрения полученных результатов.

На основе анализа распределения межклетевых натяжений и механизма формирования утолщенных концов разработана методика расчета скоростного режима редуцирования, позволяющего получать трубы с меньшей на 26 % длиной утолщенных концов.

Проведенное компьютерное моделирование процесса редуцирования с использованием скоростного режима рассчитанного с применением разработанной методики подтвердило уменьшение длины утолщенных концов на 26 %.

На основании математической модели процесса редуцирования разработана автоматизированная методика расчета технологических параметров, которая адаптирована к условиям работы редуциционно-растяжного стана АО «ВТЗ».

В ходе производства опытно-промышленной партии труб из стали марки 32Г2 с использованием технологических режимов рассчитанных с применением автоматизированной методики расчета получено более 20 % уменьшение длины переднего утолщенного конца. Произведена опытно-промышленная партия насосно-компрессорных труб из стали марки 20Х13. Определен ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанной технологии, который составит 23 млн. руб./год.

Предложен новый способ для уменьшения длины утолщенных концов. В этом способе прокатка труб осуществляется в непрерывном безоправочном многоклетьевом стане с чередующимися приводными и не приводными клетями. При этом прокатку производят в валках приводных и не приводных клетей, отношение диаметров которых составляет, соответственно $1,2 \div 1,4$. Смазку наносят на валки перед прокаткой с использованием брикетов смазочного материала. Смазка подается в приводных клетях на участки ручья калибра каждого валка, ограниченные радиусом бочки валка и катающим радиусом валка, а в не приводных – по всей ширине валка.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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

1. Для процесса редуцирования труб разработана математическая модель расчета геометрических и кинематических параметров очага деформации при прокатке в трехвалковом непрерывном безоправочном стане, учитывающая характер формоизменения деформируемого металла по периметру калибра. Данную математическую модель сравнивали с результатами твердотельного моделирования в лицензионной САД системе трехмерного проектирования КОМПАС-3D, что показало достоверность полученных зависимостей для определения геометрических параметров очага деформации (погрешность менее 0,2 %);

2. С применением энергетического метода разработана математическая модель процесса редуцирования труб в трехвалковых калибрах. Определены аналитические зависимости для расчета составляющих уравнения энергетического баланса. Разработан алгоритм решения уравнений энергетического баланса для всего стана и каждой клетки в отдельности, позволяющий научно-

обосновано определять межклетевое натяжение трубы при безоправочной прокатке в трехвалковых калибрах;

3. Достоверность полученных аналитических зависимостей по определению кинематических характеристик процесса подтверждена результатами лабораторных исследований, при этом относительная величина расхождения расчетных и экспериментальных данных при определении скорости течения металла на выходе из очага деформации не превышала 3 %;

4. Показано, что разработанные математические модели процесса редуцирования возможно эффективно использовать для анализа и повышения эффективности технологии безоправочной продольной прокатки труб. В частности, на основе полученных зависимостей межклетевого натяжения от скоростного режима, коэффициента трения, деформируемого материала, температуры деформации и исходных размеров заготовки разработана новая инженерная методика расчета скоростного режима редуцирования в трехвалковых калибрах;

5. С помощью компьютерного моделирования процесса редуцирования в лицензионном программном обеспечении QForm-3D, основанной на методе конечных элементов, подтверждена возможность уменьшения длины утолщенных концов при использовании разработанной методики расчета скоростных режимов редуцирования;

6. На основе теоретического и экспериментального исследования процесса редуцирования разработана методика расчета технологических параметров процесса редуцирования (деформационно-скоростных, энергосиловых и температурных режимов), которая численно реализована в программном продукте «EX-ram», позволяющем оперативно проводить расчеты технологических параметров. Разработанный программный продукт адаптирован к условиям работы редуцирующе-растяжного стана трубопрессовой установки усилием прессования 55 МН АО «ВТЗ» и использован при определении деформационно-скоростных режимов редуцирования труб из стали марки 32Г2. Разработанная методика позволяет производить корректировку технологического режима на основе измерений толщины стенки трубы готового размера или трубы – заготовки;

7. Результаты производства насосно-компрессорных труб наружным диаметром 73 мм с толщиной стенки 5,5 мм из стали 20Х13 в условиях АО «ВТЗ» подтвердили теоретические и экспериментальные результаты исследования, в частности, использование технологических режимов определенных с использованием разработанной программы позволили уменьшить длину утолщенных концов труб готового размера на 20 %;

8. Разработан комплексный подход к повышению эффективности процесса редуцирования труб на прессовой линии усилием 55 МН с редуционно-растяжным станом, направленный на снижение расхода металла и включающий: уменьшение расходного коэффициента металла в процентном отношении за счет увеличения длины производимых труб; уменьшение длин утолщенных концов за счет применения разработанной методики расчета скоростных режимов;

9. При производстве труб из стали 20Х13 в объеме 2 тыс. тонн/год экономический эффект от внедрения разработанной технологической структуры составит 23 млн. руб;

10. Проведено экспериментальное исследование процесса формирования физико-механических свойств стали 20Х13 при осуществлении высокотемпературной термомеханической обработки в линии редуционно-растяжного стана, позволившее разработать технологический режим, обеспечивающий получение требуемых физико-механических свойств стали 20Х13 группы прочности L80 в кладостойком исполнении в соответствии с ТУ 14-3Р-114-2011;

11. Разработано новое техническое решение, направленное на повышение эффективности процесса редуцирования, которое заключается в редуцировании труб в стане с чередующимися приводными и не приводными клетями при различных условиях контактного трения в клетях с подачей смазочного материала на валки, при этом валки не приводных клетей выполнены меньшим диаметром, что позволяет уменьшить межклетевое расстояние.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:

1. 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. – № 6. – 2014. – С. 67 – 69.

2. Храмков, Е.В. Оценка влияния различных факторов на качество горячекатаных труб / Е.В. Храмков, Б.В. Баричко, А.С. Кочкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – №4. – 2014. – С. 76 – 79.

3. Смирнов, М.А. Свойства высокохромистых коррозионностойких сталей, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке / М.А. Смирнов, И.Ю. Пышминцев, К.А. Лаев, Е.В. Храмков, Д.М. Алютин // Вестник МГТУ. – 2015. – №3. – С. 78 – 82.

4. Выдрин, А.В. Кинематика очага деформации при безоправочной прокатке труб нефтяного сортамента / А.В. Выдрин, Е.В. Храмов, М.В. Бунышин // Вестник ЮУрГУ. Серия "Металлургия". – 2016. – №1. – С. 91 – 97.

5. Выдрин, А.В. Энергетический баланс процесса прокатки труб нефтяного сортамента на редуционном стане / А.В. Выдрин, Е.В. Храмов, М.В. Бунышин // Metallurg. – 2016. – №1. – С. 21 – 25.

Публикации в других изданиях:

6. Храмов, Е.В. Исследование влияния температурно-деформационных режимов на хладостойкость стали 20Х13 / Е.В. Храмов, А.М. Ахмедьянов, К.А. Лаев, А.В. Выдрин, М.А. Смирнов // Труды XXI Международной научно-практической конференции «Трубы–2014» Сборник докладов. ОАО "РосНИТИ". – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2014. – Ч. 2. – С. 274 – 277.

7. Храмов, Е.В. Влияние температурно-деформационных режимов на свойства стали 20Х13 / Е.В. Храмов // XV международная научно-техническая уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых: сб. науч. тр. – Екатеринбург, 2014. – С. 153 – 156.

8. Храмов, Е.В. Освоение технологии производства труб из стали 20Х13 / Е.В. Храмов, К.А. Лаев // Перспективы развития металлургических технологий: Сб. тезисов VI конференции молодых специалистов – Москва, 2015. – С. 59 – 60.

9. Смирнов, М.А. Высокотемпературная термомеханическая обработка высокохромистых сталей, применяемых в нефтегазовой промышленности / М.А. Смирнов, И.Ю. Пышминцев, К.А. Лаев, Е.В. Храмов, А.М. Ахмедьянов // Физика прочности и пластичности материалов: сб. тезисов XIX Международной конференции – Самара, 2015. – С. 168.

10. Храмов, Е.В. Разработка технологии производства труб из стали типа 13Сг в хладостойком исполнении / Е.В. Храмов // Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства: материалы II международной научно-практической конференции – Магнитогорск, 2016. – С. 3 – 4.

Патенты и свидетельства:

1. Положительное решение по заявке на изобретение №2015141791 РФ, МПК В 21 В 17/00. Способ непрерывной прокатки труб и непрерывный многоклетьевого стан для его осуществления / А.В. Выдрин, В.И. Кузнецов, Е.В. Храмов. – №2015141791/02; заявл. 01.10.2015; приоритет 01.10.2015.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа «ЕХ-Ram» для автоматизированного расчета технологических параметров безоправочной прокатки труб / Е.В. Храмков, А.В. Выдрин, М.В. Бунышин. – № 2016662673; заявл. №2016619899 от 22.09.2016; зарег. в реестре программ для ЭВМ 17.11.2016 г.

Учебно-методические работы:

1. Выдрин, А.В. Технологии и оборудование для изготовления горяче-прессованных труб: учебное пособие / А.В. Выдрин, Я.И. Космацкий, Е.В. Храмков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 103 с.

