

На правах рукописи



КРАСИКОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ
ТОВАРНЫХ ТРУБ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ МАРОК СТАЛИ
НА АГРЕГАТАХ С НЕПРЕРЫВНЫМИ СТАНАМИ
С КОНТРОЛИРУЕМО-ПЕРЕМЕЩАЕМОЙ ОПРАВКОЙ**

Специальность 2.6.4 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Челябинск – 2024

Работа выполнена на кафедре процессов и машин обработки металлов давлением в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Научный консультант:

Выдрин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск

Официальные оппоненты:

Швейкин Владимир Павлович доктор технических наук, доцент, директор федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН, г.Екатеринбург

Чикишев Денис Николаевич доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г.Магнитогорск

Раскатов Евгений Юрьевич доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургических и роторных машин, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (НИУ)», г. Москва

Защита диссертации состоится «5» июня 2024 г., в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ (НИУ), главный учебный корпус, ауд. 1001

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» и на сайте: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243701-d-21229801/krasikov-andrey-vladimirovich>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ (НИУ), Ученый совет. Тел. (351) 267-91-13, e-mail: andrey.krasikov@tmk-group.com

Автореферат разослан « » _____ 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Н.А. Шабурова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы заключается в необходимости импортозамещения труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали, которые ранее закупались только за рубежом. При этом, для обеспечения конкурентного преимущества при освоении новых видов труб, необходимо сокращать производственные издержки при одновременном обеспечении высокого качества. Ярким примером такого импортозамещения является освоение технологии прокатки обсадных труб из коррозионно-стойких марок стали группы 13Cr. Данный вид труб активно применяется для освоения месторождений углеводородов, имеющих высокую температуру при добыче и транспортировке, содержащих высокие концентрации коррозионно-активных компонентов, таких как CO_2 , H_2S , ионы хлора. Подобные агрессивные условия эксплуатации трубной продукции вызывают интенсивную коррозию углеродистых марок стали, получивших наибольшее распространение при производстве труб нефтяного сортамента. Именно поэтому производство труб из коррозионно-стойких марок стали, в том числе нержавеющей марок стали мартенситного класса с содержанием хрома около 13 %, является приоритетной, стратегической задачей.

Изначально трубопрокатные агрегаты (ТПА) с непрерывными станами были предназначены для прокатки продукции из углеродистых и легированных марок стали. Однако, растущие эксплуатационные требования на сложных месторождениях нефти и газа, ставят перед отечественными трубопрокатчиками новые задачи по изготовлению высокотехнологичных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали, изготовление которых ранее считалось возможным только прессованием.

В этой связи требуется проведение всестороннего исследования и разработка теоретических основ для создания и освоения сквозной технологии изготовления новых видов трубной продукции специального назначения из коррозионно-стойких марок стали с применением прокатки.

Целью диссертационной работы является разработка теоретических основ для создания и освоения сквозной технологии изготовления новых видов трубной продукции специального назначения из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса с применением прокатки на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой.

Основные задачи:

1. Изучение особенностей пластических и прочностных свойств коррозионно-стойкой марки стали аустенитного класса, а также исследование их трансформации на различных переделах в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой.

2. Определение требований к дезоксиданту и графитовой смазке для обеспечения качества труб из коррозионно-стойких марок стали, а также стойкости контролируемо-перемещаемых оправок. Исследование особенностей влияния температуры, дезоксидирующих материалов и смазок на коэффициент контактного трения при деформировании коррозионно-стойких марок стали аустенитного класса.

3. Разработка технологических схем подготовки непрерывно-литых заготовок из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса к прокатке труб в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой.

4. Исследование с применением компьютерного моделирования закономерностей формоизменения металла при прошивке заготовок и раскатки гильз; оценка влияния технологических факторов прокатки на качество поверхности и точность геометрических параметров труб из коррозионно-стойких марок стали.

5. Моделирование процессов прошивки заготовок и раскатки гильз из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса на лабораторных станах.

6. Определение условий и факторов, обеспечивающих повышение износостойкости оправок при прошивке коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса.

7. Разработка и внедрение сквозной технологии прокатки труб из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой.

Методы исследований: Теоретические исследования, базируются на закономерностях теории пластичности и теории обработки металлов давлением. Лабораторные и промышленные исследования выполнены с использованием современного оборудования и измерительных приборов, прошедших метрологическую поверку. При проведении исследований использованы методы математического моделирования технологических процессов с применением вычислительной техники и современных программных продуктов, результаты экспериментальных исследований обрабатывались с помощью методов математической статистики.

Личный вклад автора состоит в постановке задач как теоретических, так и лабораторных исследований с целью моделирования изучаемых процессов, а также промышленных экспериментов при освоении новой технологии; в создании теоретических и технологических основ для разработки новой технологии прокатки товарных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой; во внедрении новой технологии в условиях действующих ТПА.

Научная новизна диссертации:

- разработана уникальная методика проведения и обработки результатов исследования пластичности и сопротивления металлов и сплавов пластической деформации с использованием современного испытательного оборудования, позволяющая учитывать влияние истории нагружения при изготовлении бесшовных горячедеформированных труб на ТПА с непрерывными станами, с помощью которой получены новые научно-обоснованные знания о закономерностях изменения сопротивления пластической деформации коррозионно-стойкой стали аустенитного класса в зависимости от степени деформации, скорости деформации, температуры и истории деформирования;

- впервые обнаружены и теоретически обоснованы закономерности формоизменения металла в процессах прошивки сплошных и полых заготовок, а также раскатки гильз из коррозионно-стойких марок стали аустенитного класса в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой, с использованием компьютерного моделирования в программной среде QForm 3D, учитывающие особенности контактных взаимодействий с технологическим инструментом;

- впервые определены численные значения коэффициента контактного трения в процессе горячей деформации коррозионно-стойкой стали при наличии на контактных поверхностях дезоксидирующих и смазочных материалов;

- впервые определены закономерности трансформации структуры, пластических и прочностных свойств коррозионно-стойких марок стали применительно к многооперационной и многопроходной схеме производства труб в линии ТПА с непрерывным раскатным станом;

- разработана универсальная математическая модель для расчета энергосиловых параметров процесса горячей раскатки гильз в непрерывном стане с различным количеством валков, образующих калибр, а также алгоритм ее численной реализации.

Достоверность основных положений и выводов в диссертации обеспечивается:

- использованием в теоретических исследованиях основополагающих принципов теории обработки металлов давлением;

- использованием для проведения экспериментальных исследований и компьютерного моделирования общепризнанных методов изучения процессов обработки металлов давлением, поверенных оборудования и приборов, а также стандартного программного обеспечения;

- согласованностью теоретических и экспериментальных результатов исследования, полученных различными методами; отсутствием противоречий

результатов работы известным теоретическим и технологическим закономерностям процессов обработки металлов давлением;

- соответствием теоретических результатов работы и высказанных на их основе практических рекомендаций результатам промышленных экспериментов, проведенных при освоении новой технологии прокатки бесшовных горячедеформированных труб на ТПА с непрерывными станами.

Практическая значимость диссертации определяется:

- разработкой и внедрением новых способов подготовки к прокатке непрерывно-литых заготовок из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса, устраняющих осевую рыхлость (центральную пористость и осевые трещины) и, тем самым, предотвращающих образование дефектов на внутренней поверхности труб;

- разработкой и внедрением новых технологий прокатки труб из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса, обеспечивающих высокое качество внутренней и наружной поверхности, точность геометрических размеров, а также требуемые эксплуатационные свойства для нефтяной и атомной промышленности Российской Федерации;

- повышением износостойкости оправок при прошивке заготовок из коррозионно-стойких марок стали с 3 до 60 проходов, что позволило увеличить производительность участка горячего проката труб более, чем в 2 раза в сравнении с ранее достигнутой;

- сформулированными требованиями к дезоксидирующим и смазочным материалам, обеспечивающими высокое качество внутренней поверхности бесшовных труб из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса.

В результате выполнения комплексного исследования в рамках диссертационной работы решена важная народнохозяйственная проблема импортозамещения труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали. На предприятиях ПАО «ТМК» на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой внедрена новая сквозная технология производства высококачественных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса. Разработанные технические решения, обеспечившие реализацию новой технологии, защищены 10 патентами Российской Федерации и 2 свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ.

На защиту выносятся:

- методика проведения и обработки результатов исследования сопротивления металлов и сплавов пластической деформации, позволяющая учитывать влияние

истории нагружения в процессе горячей деформации при изготовлении бесшовных труб на ТПА с непрерывными станами;

- результаты исследования трансформации свойств коррозионно-стойкой марки стали аустенитного класса на различных переделах в линии ТПА с непрерывным станом;

- результаты исследования закономерностей изменения сопротивления пластической деформации коррозионно-стойкой стали аустенитного класса в зависимости от степени и скорости деформации, температуры и истории деформирования при изготовлении бесшовных труб из непрерывно-литой заготовки на ТПА с непрерывными станами;

- результаты исследований свойств применяемых смазочных и дезоксидирующих материалов, их влияния на коэффициент контактного трения, а также значения коэффициентов трения на контакте трубы с валками и на контакте трубы с оправкой при горячей деформации;

- усовершенствованная методика и результаты компьютерного моделирования процессов прошивки непрерывно-литой заготовки и раскатки гильз из коррозионно-стойких марок стали в линии ТПА;

- результаты экспериментального исследования процессов прошивки непрерывно-литых заготовок и раскатки гильз из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса на лабораторных станах;

- математическая модель процесса раскатки гильз в непрерывном стане с контролируемо-перемещаемой оправкой;

- новая технология подготовки к прокатке непрерывно-литых заготовок из коррозионно-стойких марок стали, устраняющая осевую рыхлость (центральную пористость и осевые трещины);

- технические предложения по повышению износостойкости оправок при прошивке непрерывно-литых заготовок из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса;

- новая наукоемкая сквозная технологии изготовления новых видов бесшовных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой.

Апробация работы: Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на: XI международном конгрессе прокатчиков (Объединение прокатчиков, Магнитогорск, 2017); XXIII международной научно-практической конференции «ТРУБЫ-2018» (АО «РусНИТИ», Челябинск, 2018); XII международном конгрессе прокатчиков (Объединение прокатчиков, Выкса, 2019); XXIV международной научно-практической конференции «ТРУБЫ-2021» (АО «РусНИТИ», Челябинск, 2021); XV международной конференции «MECHANICS,

RESOURCE AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS AND STRUCTURES» (ESIS, Екатеринбург, 2021); XIII международном конгрессе прокатчиков (Объединение прокатчиков, Москва, 2022); 15-ой научной конференции аспирантов и докторантов (ЮУрГУ, Челябинск, 2023); XXV международной научно-практической конференции «ТРУБЫ-2023» (АО «РусНИТИ», Челябинск, 2023) и других конференциях.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 45 печатных работ, в том числе 12 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 8 в изданиях, входящих в наукометрические базы данных «Scopus» и «Web of Science», 1 монография, 10 патентов РФ и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, основных результатов и выводов, изложена на 383 страницах машинописного текста, включающего 194 рисунка, 62 таблицы, библиографический список из 161 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность научной проблемы, приведены цель и задачи исследования, рассмотрен объект и предмет исследования, а также изложена научная новизна, практическая ценность результатов, их апробация и внедрение в производство.

В первой главе проведен анализ современных способов производства бесшовных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали. Сделан вывод, что в настоящее время для изготовления таких труб безальтернативной считается технология на основе прессования.

По результатам сравнительного анализа различных способов получения заготовок для производства бесшовных труб сделан вывод, что в качестве исходной заготовки целесообразно использовать непрерывно-литую заготовку (НЛЗ) круглого сечения. При этом необходимо стремиться к минимизации числа типоразмеров НЛЗ для обеспечения всей производственной программы.

Сравнительный анализ особенностей прошивки заготовок в двухвалковых станах винтовой прокатки с различным направляющим инструментом показал, что в производстве бесшовных горячедеформированных труб большого диаметра целесообразно применять процесс прошивки с увеличением диаметра по отношению к диаметру заготовки.

Рассмотрены достоинства и недостатки различных вариантов раскатки гильзы в черновую трубу на ТПА с автомат-станом, непрерывным станом, пилигримовым станом, трехвалковым раскатным станом и речным станом. Установлена высокая

эффективность использования в качестве раскатных – непрерывных станов с контролируемо-перемещаемой оправкой. Преимуществами такого процесса являются высокая производительность, минимальные технологические отходы и расположение оборудования, удобное для автоматизации технологических операций.

Отмечено, что значительный прогресс в улучшении качества и расширении диапазона размеров бесшовных труб достигнут в результате создания новых непрерывных станов с трехвалковыми клетями. Поэтому такая технология получает широкое распространение за рубежом и внедряется на отечественных предприятиях.

Учитывая идентичную схему напряженного состояния деформируемого металла, а именно схему всестороннего сжатия как наиболее благоприятную с точки зрения пластичности металла, применение ТПА с непрерывными станами и контролируемо-перемещаемой оправкой теоретически может являться полноценной альтернативой прессованию для изготовления товарных труб специального назначения из НЛЗ коррозионно-стойких марок стали.

На основании проведенного обзора научно-технической литературы сформулированы цели и задачи исследований.

Во второй главе представлены результаты разработки методики исследования и прогнозирования пластических и прочностных свойств коррозионно-стойких марок стали различных классов при изготовлении бесшовных горячедеформированных труб.

Для проведения пластометрических исследований стали марки 08X18H10T в горячем состоянии выбран комплекс с цифровой системой термомеханического моделирования «Gleeble 3800». Испытания проводились в вакуумной среде с использованием следующих модулей: HydraWedge (сжатие), PocketJaw (растяжение) и Torsion (кручение). Контроль температуры при нагреве, а также измерение деформационного разогрева осуществляли с использованием хромель-алюмелевых термопар, которые приваривались к образцам. Температурные режимы и режимы деформации, при которых проводились испытания, выбраны в соответствии с режимами характерными для ТПА 159-426 АО «ВТЗ». Деформация производилась при температурах: 1250, 1200, 1100, 1000 и 900 °С со скоростью деформации 15 с⁻¹.

При выборе вида зависимости, описывающей диаграмму пластичности металлов и сплавов при горячем деформировании, была учтена возможность ее линеаризации для применения метода наименьших квадратов при обработке результатов эксперимента. В итоге было предложено воспользоваться следующей формулой:

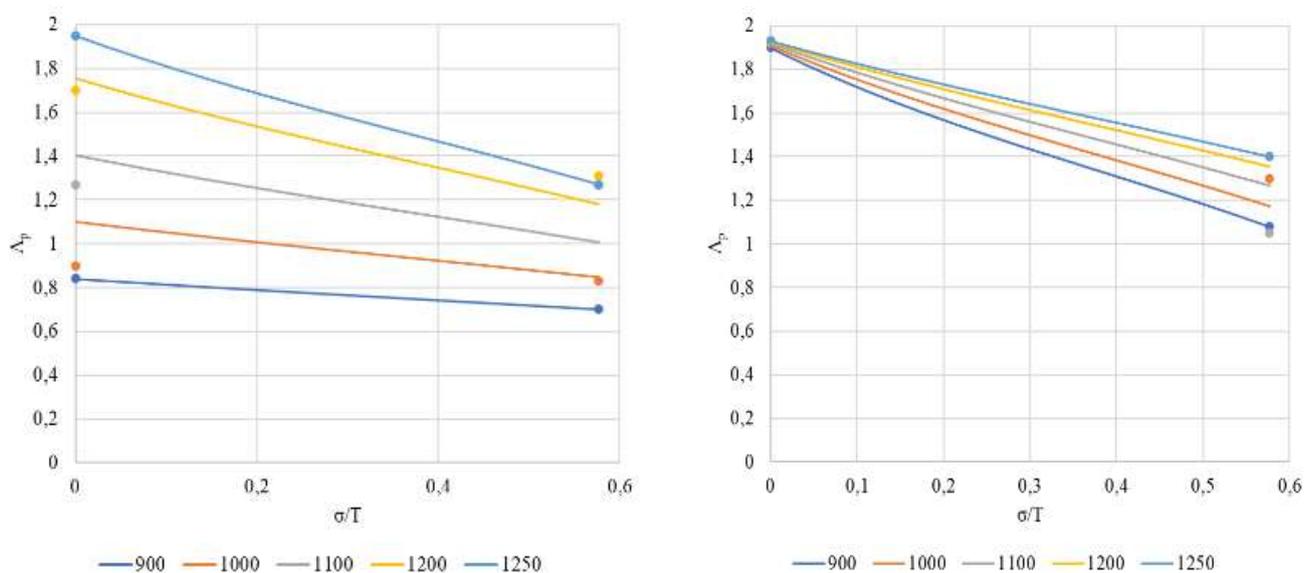
$$\Lambda_p = a_0 \left(\frac{\theta}{1000} \right)^{a_1 + a_{12} \frac{\sigma}{T}} \exp \left(a_2 \frac{\sigma}{T} \right), \quad (1)$$

где a_0 , a_1 , a_2 , a_{12} – эмпирические коэффициенты, определяемые при испытаниях; θ – температура нагрева образца; σ – среднее нормальное напряжение;

T – интенсивность касательных напряжений; Λ_p – пластичность металла (степень деформации, накопленная металлом к моменту разрушения).

Для определения значений эмпирических коэффициентов применительно к стали марки 08X18H10T проведены эксперименты с использованием комплекса Gleeble 3800. При этом с целью варьирования напряженного состояния образцы подвергались одноосному растяжению и сжатию в диапазоне температур от 900 °С до 1250 °С. При этом были реализованы значения $\frac{\sigma}{T}$, равные +0,58 и -0,58 соответственно. Однако в опытах на сжатие образцы не удалось продеформировать до разрушения из-за ограниченной мощности испытательной машины. Поэтому была проведена вторая серия экспериментов, включающая опыты на кручение в том же диапазоне изменения температур.

В рамках исследования были проведены преобразования формулы (1) и необходимые вычисления. В результате получены параметрические уравнения, позволяющие определить трансформацию степени деформации сдвига, накапливаемой к моменту разрушения в процессе производства труб, а также построены диаграммы пластичности марки стали 08X18H10T, представленные на рисунке 1.



$$\Lambda_p = 1,1 \cdot \left(\frac{\theta}{1000}\right)^{2,56-1,3 \frac{\sigma}{T}} \exp\left(-0,45 \frac{\sigma}{T}\right)$$

а) НЛЗ

$$\Lambda_p = 1,91 \cdot \left(\frac{\theta}{1000}\right)^{0,05+1,29 \frac{\sigma}{T}} \exp\left(-0,84 \frac{\sigma}{T}\right)$$

б) гильза

Рисунок 1 – Диаграммы и параметрические уравнения пластичности стали марки 08X18H10T (а – НЛЗ, б – гильза)

Для исследования сопротивления пластической деформации стали марки 08X18H10T была также разработана специальная методика. Согласно предложенному подходу для математического описания закономерностей изменения сопротивления металла пластической деформации с учетом процессов упрочнения и разупрочнения необходимо экспериментально определить значения коэффициентов характеризующих упрочнение металла в условиях отсутствия разупрочняющих процессов (при деформации в холодном состоянии); коэффициентов характеризующих влияние начальной температуры нагрева на сопротивление металла пластической деформации НЛЗ; коэффициентов характеризующих влияние температуры на интенсивность разупрочнения металла во время паузы между деформациями. Разработанная методика впервые была реализована с использованием многофункционального испытательного комплекса Gleeble 3800.

Результаты исследования сопротивления пластической деформации стали марки 08-12X18H10T позволяют предложить для его определения в диапазоне температур 900⁰C – 1200⁰C следующее уравнение:

$$\sigma_{si} = 200 \left(\frac{1350 - \theta_0}{1325} \right)^{0,87} + \sum_{i=1}^m \left\{ 1064(\varepsilon_i^{0,78} - \varepsilon_{i-1}^{0,78}) + (\sigma_{s(i-1)} - \sigma_{s0}) \left[\exp \left(- \frac{\Delta\tau_i}{4,75 \frac{1350-\theta}{\theta-25} - 0,93} \right) - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

где i – номер интервала на которые разбивается продолжительность паузы между нагружениями;

m – число временных интервалов;

$\Delta\tau_i$ – продолжительность паузы между нагружениями.

Также была обнаружена еще одна реологическая особенность коррозионно-стойких марок стали аустенитного класса – гораздо более высокие скорости разупрочнения, чем у марок стали феррито-перлитного класса.

В третьей главе изложены результаты исследования свойств смазочных и дезоксидирующих материалов, применяемых в линиях ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой. Описано оборудование для эффективной подачи дезоксиданта и графитовой смазки, а также даны рекомендации по их применению. Проведен анализ влияния дезоксиданта и графитовой смазки на качество внутренней поверхности готовых труб.

Установлено, что при прокатке труб, в том числе из коррозионно-стойких марок стали на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой:

- с целью эффективной борьбы с окалиной для обработки внутренней поверхности гильзы необходимо использовать дезоксидирующий материал из

неорганических плавких солевых смесей на основе щелочных фосфатов с боратными добавками без графита и органических веществ.

- для гарантированного разделения контактных поверхностей трубы и контролируемо-перемещаемой оправки необходимо использовать смазочное вещество, представляющее собой сочетание графита и неорганических плавких солей, с набором функциональных ингредиентов, влияющих на адгезию, плёнообразование смазочного слоя, седиментацию, вязкость, антибактериальность.

Выполненный комплекс исследований показал, что для обеспечения высокого качества обработки внутренней поверхности стальных гильз, в том числе из коррозионно-стойких марок стали, а также высокой стойкости оправок непрерывного стана, смазочно-дезоксирующий материал должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- иметь плавкий комбинированный состав, состоящий из неорганических плавких солевых смесей на основе щелочных фосфатов с боратными добавками, и не содержащий графит;

- равномерно распределён по внутренней поверхности гильзы, например, распылением;

- быть плавким в интервале рабочих температур прокатки труб – 900-1200⁰С;

- иметь размеры гранул не более 1000 мкм;

- иметь вязкость в пределах 0,5÷1,5 Па·с.

Оборудование для подачи смазочно-дезоксирующего материала должно помимо полной обработки внутренней поверхности, обеспечивать его дифференцированную подачу вдоль внутренней поверхности гильзы, учитывая, таким образом, неравномерное образование окалины по её длине.

Для обеспечения высокого качества обработки рабочей поверхности контролируемо-перемещаемых оправок непрерывных станов, в том числе при прокатке труб из коррозионно-стойких марок стали, а также высокой износостойкости инструмента и качества готовых труб смазочный материал должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- содержать природный графит с высокой термоокислительной устойчивостью и с зольностью менее 1 %;

- графитовая смазочная суспензия должна быть однородной, без комочков, пены и неприятного запаха, а также образовываться за период времени, указанный в рекомендациях для ее приготовления (ориентировочно за 30-60 минут);

- иметь благоприятное значение показателя рН 7-10 (нейтральная – слабощелочная среда);

- обеспечивать высокие теплозащитные свойства.

Для нанесения графитовой смазочной суспензии на поверхность контролируемо-перемещаемой оправки необходимо использовать способы

воздушного или безвоздушного распыления для получения сплошного равномерного смазочного слоя без пузырей и отслоений.

Впервые проведено исследование влияния смазочных материалов на коэффициент трения при прокатке труб из стали марки 08X18H10T. В случае горячей деформации для определения напряжений трения более подходит закон, предложенный Э. Зибелем, т.е. $\tau = f\tau_s$, где τ – напряжение трения; f - коэффициент контактного трения; τ_s – сопротивление металла пластической деформации сдвига.

Экспериментальные исследования проводились по специально разработанной методике на автоматизированном цифровом пластометре конструкции ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» - «Многокулачковый пластометр ЧПИ-2». Результаты представлены на рисунке 2.

Результаты эксперимента в целом не противоречат имеющейся информации о зависимости коэффициента трения от температуры. При том получены новые данные о влиянии смазочных и дезоксидирующих материалов на коэффициент трения. Установлено, что наиболее весомое положительное влияние на коэффициент трения оказывает дезоксидирующий материал. Косвенно это подтверждается тем, что при дополнительной подаче дезоксидирующего порошка в гильзу перед раскатным станом удалось снизить усилие удержания оправки.

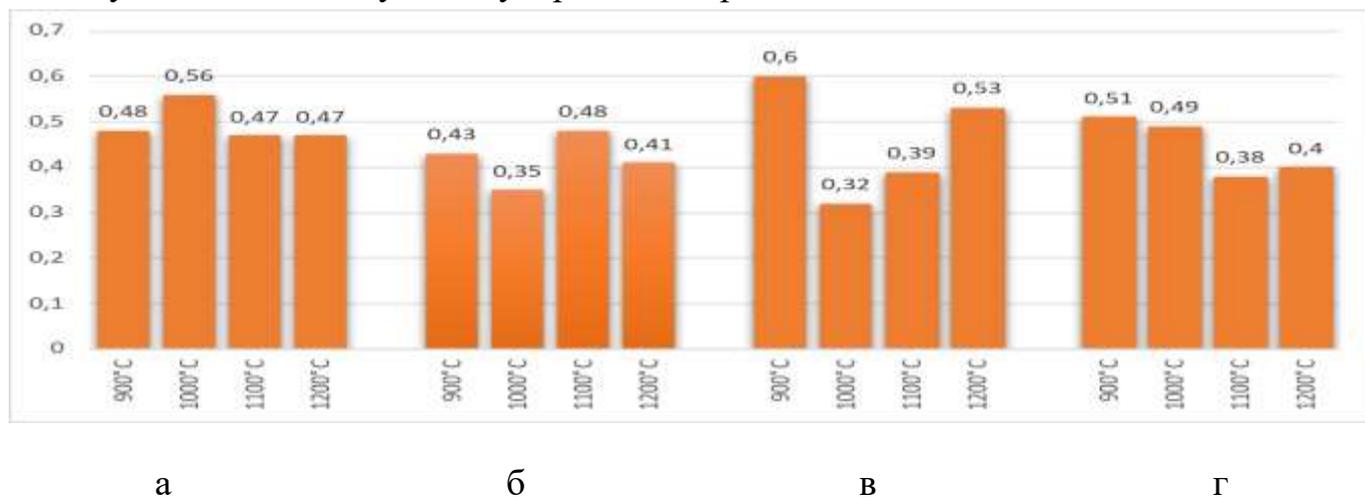


Рисунок 2 – Средние значения коэффициента трения при отсутствии третьих веществ (а); с напылением дезоксидирующего порошка (б); при нанесении графитовой смазки (в); с дезоксидирующим порошком и графитовой смазкой (г)

На основании проведенного эксперимента сделан вывод о том, что при горячей прокатке труб из стали марки 08X18H10T для контактной поверхности трубы и вала характерно значение коэффициента трения 0,47, а для контактной поверхности трубы и оправки 0,38. Оба этих значения выше, чем при прокатке труб из углеродистых марок стали, который составляет 0,19-0,24.

В четвертой главе представлены результаты разработки технологии подготовки НЛЗ из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса для прокатки труб на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой.

Проведенный анализ свойств заготовок из марок стали группы 13Cr позволил определить следующую технологическую схему их производства и подготовки к прокатке, этапы которой включают в себя следующие основные операции:

- 1) выплавка и разливка НЛЗ по технологии АО «ВТЗ»;
- 2) термообработка НЛЗ;
- 3) обрезка переднего конца, порезка на две части, обрезка заднего конца;
- 4) сверление НЛЗ;
- 5) дробеметная обработка НЛЗ;
- 6) осмотр НЛЗ, ремонт дефектов при необходимости.

Термическая обработка заготовки сталей данного класса необходима для снижения твердости материала перед дальнейшей механической обработкой на станках глубокого сверления и выполняется по режиму смягчающего отжига. Порезкой получают нужный по заказу раскрой металла, а также торцы заготовки допустимой косины реза. Операция сверления позволяет удалить осевую рыхлость металла и, тем самым, предотвращает образование дефектов на внутренней поверхности труб. Дробеметной обработкой удаляется окалина с поверхности заготовки. За ней следует осмотр и, при необходимости, ремонт поверхности.

В работе исследованы размер и особенности расположения осевой несплошности в НЛЗ, что необходимо учитывать при разработке технологии подготовки заготовки к прошивке. В частности, на рисунке 3 представлено изображение темплета заготовки из стали марки 15Х13Н2 диаметром 340 мм. Замеры показали, что диаметр осевой несплошности составляет 40 мм со смещением около 10 мм от геометрического центра. Данное обстоятельство необходимо учитывать при выборе диаметра сверла, чтобы обеспечить полное удаление осевой рыхлости (центральная пористость и осевые трещины) литого металла. Для вычисления необходимого диаметра сверла предложена следующая формула:

$$D_{св} = (0,15 \div 0,3) d_{заг} K_{он}, \quad (3)$$

где $D_{св}$ – диаметр высверливания осевого отверстия, мм;

$d_{заг}$ – диаметр заготовки, мм;

$K_{он}$ – коэффициент осевой неоднородности, равный 1,07-1,09 для заготовок всех диаметров.

Поскольку на практике парк сверл ограничен, выбирать нужно ближайшее по размеру сверло, диаметр которого превышает значение, вычисленное по формуле 3.

В противном случае остатки осевых несовершенств металла литой структуры приведут к внутренним дефектам на готовых трубах.



Рисунок 3 – Темплет заготовки из стали марки 15X13H2 диаметром 340 мм

В качестве примера на рисунке 4 представлен эскиз полностью подготовленной к прокатке НЛЗ из стали марки 15X13H2 диаметром 340 мм. Для исключения нанесения дефектов от острой кромки на прошивную оправку по переднему концу заготовки между ее торцом и внутренним отверстием рекомендуется делать скругление.

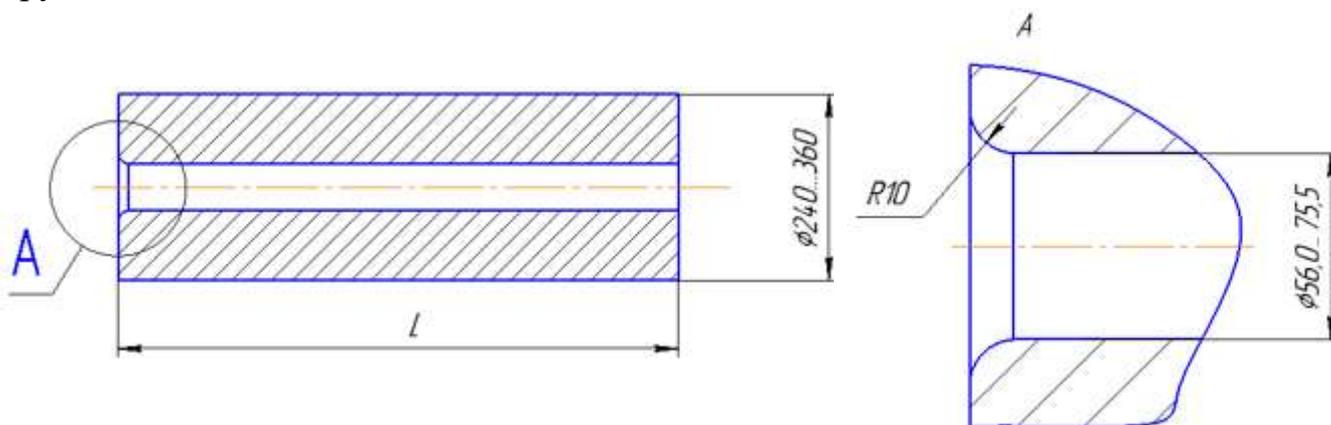


Рисунок 4 – Схема подготовленной заготовки

Анализ свойств заготовок из марки стали 08X18H10T позволил определить следующую технологическую схему их производства и подготовки к прокатке, этапы которой включают в себя следующие основные операции:

- 1) выплавка и разливка НЛЗ по технологии АО «ВТЗ»;
- 2) обточка наружной поверхности НЛЗ;
- 3) осмотр качества наружной поверхности;
- 4) обрезка переднего конца, порезка на две части, обрезка заднего конца;
- 5) сверление НЛЗ.

Обточкой наружной поверхности НЛЗ из марки стали 08X18H10T удаляются несовершенства сталеплавильного происхождения. Порезка позволяет получить гладкие торцы заготовки допустимой косины реза, а также нужный по заказу раскрой металла. Операция сверления за счет удаления осевой рыхлости металла обеспечивает высокое качество внутренней поверхности труб.

Расчет диаметра сверла и вид полностью подготовленной к прокатке НЛЗ из стали марки 08X18H10T полностью аналогичны группе марок стали типа 13Cr.

Предложенные технологии подготовки НЛЗ марки стали 08X18H10T и марок стали группы 13Cr устраняют недостатки структуры непрерывно-литой заготовки и обеспечивают высокое качество внутренней поверхности гильзы.

В пятой главе представлены результаты исследования процесса прошивки заготовок из коррозионно-стойких марок стали в стане винтовой прокатки.

С использованием программного комплекса QForm 3D проведено моделирование процесса прошивки как полой непрерывно-литой, так и сплошной ковальной заготовки из марки стали 08X18H10T для последующей раскатки. По результатам моделирования установлено следующее:

- в обоих случаях геометрические показатели гильз соответствуют требованиям, предъявляемым к заготовкам, прокатываемым в непрерывном стане;

- при прошивке сплошной заготовки величина износа оправки в 1,5 раза выше, чем при прошивке полой;

- для сплошной заготовки наблюдаются области с повышенным уровнем растягивающих напряжений, что в дальнейшем может привести к разрывам металла на внутренней поверхности гильзы;

- в среднем пластичность металла сплошной ковальной заготовки незначительно выше, чем у полой литой. Однако на переднем торце сплошной заготовки в осевой зоне ввиду неблагоприятного напряженного состояния показатель истощения ресурса пластичности больше в 2,7 раза, чем для переднего торца полой заготовки (результаты получены с учетом исследования пластичности, выполненного в главе 2).

Как видно из рисунка 5(а) максимальное значение степени истощения ресурса пластичности ковальной заготовки наблюдается в центре заготовки на переднем торце. Следовательно, при превышении степени истощения ресурса пластичности более 1

в этом месте и практически по всей длине будут образовываться сначала трещины, а потом дефекты типа плена. На заднем торце сплошной заготовки наблюдается наиболее пластичная область, что также подтверждается практикой, так как на заднем торце может образовываться кольцевое отслоение.

Для полой заготовки (рисунок 5б) степень истощения ресурса пластичности по всему объему распределена более равномерно. Стоит отметить, что ее максимальное значение наблюдается в поверхностных слоях на переднем торце и не превышает 0,5, что не несет серьезных рисков получения дефектов в виде расслоений при использовании стандартных настроек прошивного стана.

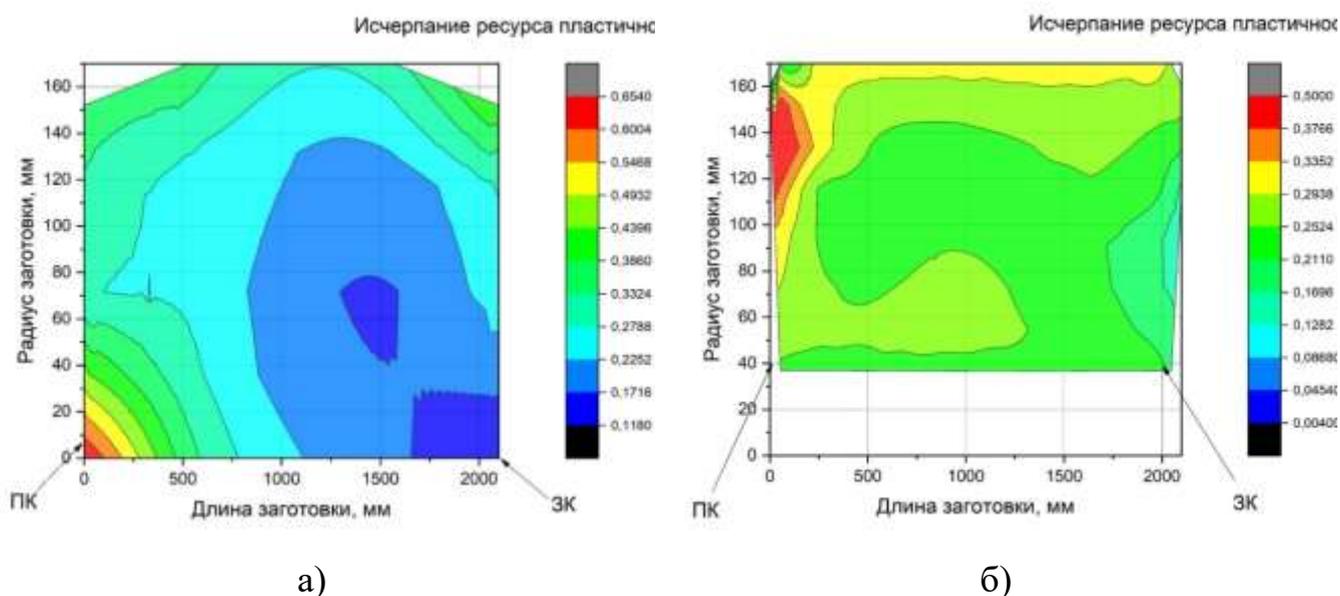


Рисунок 5 – Изменение истощения ресурса пластичности для сплошной (а) и полой (б) заготовки по ее длине (ПК – передний конец; ЗК – задний конец)

Таким образом, сделан вывод, что для прокатки труб из марки стали 08X18H10T использование полой НЛЗ целесообразно.

Для лабораторного моделирования процесса прошивки были изготовлены оправки из различных марок стали с классической калибровкой № 1-4 и оправка № 5 со специальной калибровкой рабочей поверхности с нанесением на нее продольных выточек. Моделирование процесса прошивки коррозионно-стойкой марки стали 20X13С проводилось на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д.

По результатам лабораторного моделирования показана принципиальная возможность прошивки заготовок из коррозионно-стойкой марки стали мартенситного класса в двухвалковом стане винтовой прокатки. Наилучшие показатели стойкости наблюдаются у оправок из стали марки 20X2H4A как с действующей калибровкой, так и с экспериментальной калибровкой (продольные выточки на рабочей поверхности).

Для решения проблемы повышения стойкости прошивных оправок, при прокатке труб из коррозионно-стойких марок стали, в первую очередь, было проведено промышленное экспериментальное исследование по подбору материала для изготовления инструмента. В таблице 1 представлены сравнительные результаты исследования процесса прошивки с использованием для изготовления оправок базового материала, применяемого традиционно для изготовления прошивных оправок, и новой марки стали с большим содержанием вольфрама, предложенной для повышения их стойкости. Так же, представлен фактический показатель стойкости оправок для каждого материала при прошивке заготовок из стали марок типа 13Cr. Стойкость определена как количество заготовок диаметром 340 мм и длиной 2000-3000 мм, прошитых в гильзы диаметром 314-344 мм с толщиной стенки 30-35 мм до появления на оправке недопустимых признаков износа и налипания на ее рабочей поверхности.

Таблица 1 – Фактический химический состав испытанных оправок и их стойкость при прошивке заготовок из стали марок типа 13Cr

Марка стали	Массовая доля элементов (средние значения), %										Кол-во заготовок, прошитых на одной оправке, шт
	C	Cr	Ni	Mo	V	W	Co	Mn	Si	Nb	
20X2H4MФА	0,15	1,58	3,40	0,38	0,42	0,06	0,03	0,48	0,38	-	3
20XH2MB3KB	0,23	0,49	1,47	1,20	0,04	2,80	0,96	0,51	0,50	0,19	6

Кроме того, помимо изменения химического состава материала оправок, исследовано влияние формы оправок на их износостойкость. Наилучший результат получился при использовании оправки с особой обработкой поверхности рабочего конуса – созданием рифления (рисунок б).

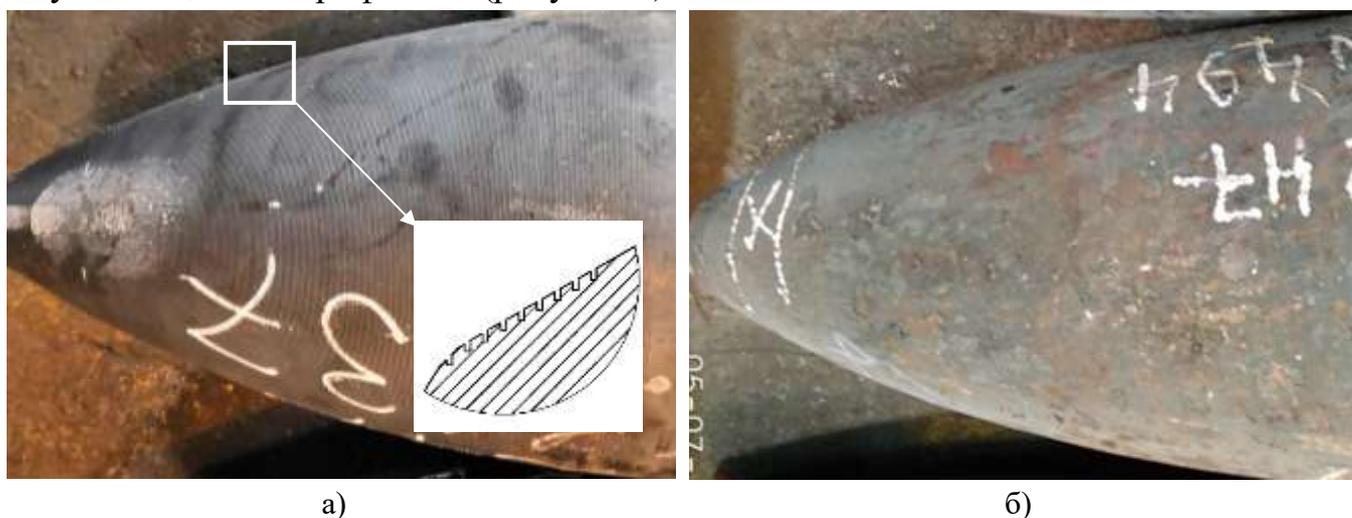


Рисунок б – Внешний вид рабочей поверхности новой оправки: а) с рифлением на рабочей поверхности; б) без рифления

Наличие рифления на поверхности рабочего конуса оправки позволило достичь прирост стойкости в 20 раз (с 3 до 60 проходов) без существенного изменения стоимости инструмента и полностью решило проблему низкой стойкости оправок при прошивке коррозионно-стойких марок стали в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ».

В шестой главе приведены результаты исследования процесса раскатки гильз из коррозионно-стойких марок стали в непрерывном стане продольной прокатки.

Оценка влияния различных технологических схем получения труб на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой из стали 08-12X18H10T проводилась с использованием компьютерного моделирования процесса раскатки гильз в программной среде QForm 3D. По результатам моделирования процесса раскатки гильзы в непрерывном стане продольной прокатки установлено следующее:

- усилие удержания оправки при прокатке марки стали 08X18H10T больше на 20 % по сравнению с усилием при прокатке нелегированных марок стали;
- при увеличении начальной температуры гильзы с 1150 до 1200 °С нагрузка на оправку снижается на 17-18 %;
- при изменении частоты вращения валков первой клетки усилие удержания оправки практически не изменяется;
- при изменении коэффициента трения на контакте с оправкой в диапазоне от 0,08 до 0,5 существенного изменения в энергосиловых параметрах не было выявлено;
- уменьшение размера гильз с 424x36 мм до 421x32 мм позволяет снизить усилие удержания оправки до 16 %, а крутящий момент в первой клетки на 46 %;
- наименьший суммарный угол охвата оправки наблюдается у стали марки 20, наибольший угол охвата наблюдается при прокатке стали марки 08-12X18H10T. При увеличении температуры подката наблюдается зависимость снижения угла охвата. При уменьшении размера гильзы, также наблюдается снижение величины суммарного охвата оправки;
- при одинаковом диаметре оправки непрерывного стана и при использовании существующей калибровки валков охват оправки металлом раската может изменяться в межклетевых промежутках;
- уменьшению угла охвата оправки непосредственно в очаге деформации может способствовать изменение диаметра оправки непрерывного стана и уменьшение угла обжимной зоны калибров в клетях.

Исходя из проведенного моделирования, следует вывод, что для обеспечения стабильной раскатки гильз из марки стали 08X18H10T в непрерывном стане необходимо использовать гильзу с уменьшенной на 15-20 % толщиной стенки.

Также в программной среде QForm 3D с применением методики планирования эксперимента было проведено компьютерное моделирование формоизменения

металла стали марки 08X18H10T при раскатке гильзы в черновую трубу. Исходные данные моделирования представлены на рисунке 7 и в таблице 2.

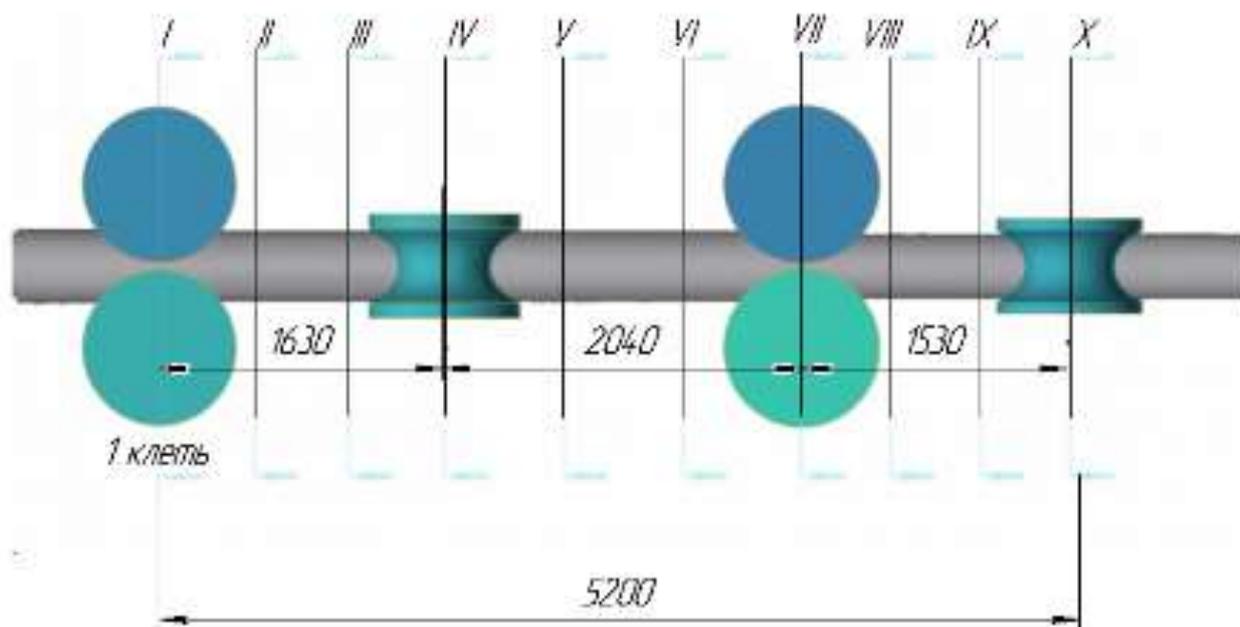


Рисунок 7 – Количество исследуемых сечений для анализа угла охвата и ширины трубы

Таблица 2 – План вычислительного эксперимента моделирования

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5, X_6	X_7, X_8	X_9
		Скорость удержания оправки	Радиус по вершине калибра 2-й клетки, мм	Эксцентриситет калибра 2-й клетки, мм	Угол выпуска			Частота вращения валков 2-й клетки
1	+	600	185	5	44	+	+	45
2	+	900	185	5	34	+	-	60
3	+	600	190	5	34	-	+	60
4	+	900	190	5	44	-	-	45
5	+	600	185	0	44	-	-	60
6	+	900	185	0	34	-	+	45
7	+	600	190	0	34	+	-	45
8	+	900	190	0	44	+	+	60

Анализ результатов компьютерного моделирования формоизменения металла при раскатке в непрерывном стане показал высокую вероятность окова оправки в случае использования действующих технологических настроек. При раскатке труб из коррозионно-стойкой марки стали аустенитного класса 08X18H10T необходимо уменьшить скорость прокатки, увеличить зазоры, а также применять гильзу с более тонкой стенкой. Этим условиям соответствуют результаты моделирования, соответствующие опыту номер 5 (рисунок 8).

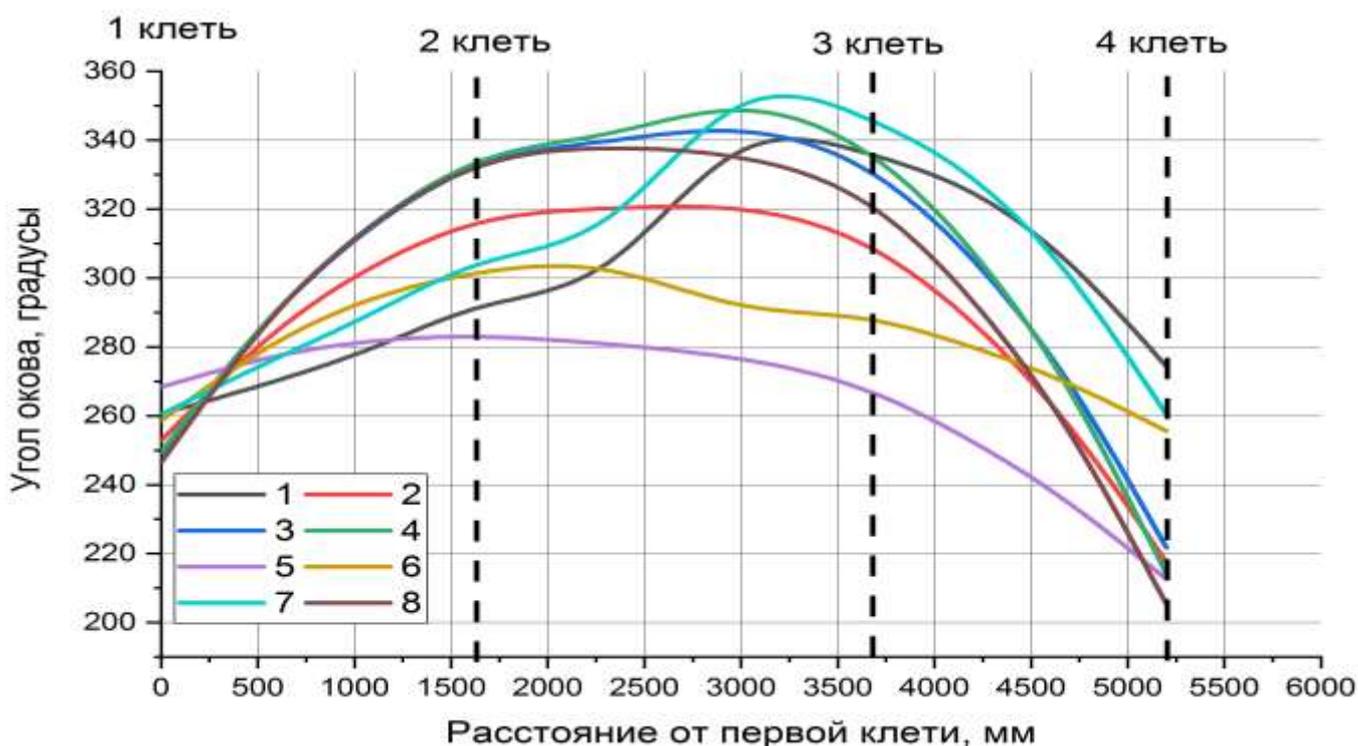


Рисунок 8 – Распределение величины охвата оправки металлом (номера кривых соответствуют номерам опытов таблицы 2)

Кроме этого, оценили влияние различных технологических факторов на точность геометрических параметров, энергосиловые параметры процесса и охват оправки металлом путем экспериментального исследования процесса прокатки патрубков 37×2,5 мм из стали марки 08X18H10T на лабораторном прокатном стане АО «РусНИТИ» как для случая плавающей оправки, так и для случая контролируемо-перемещаемой.

По результатам лабораторного моделирования раскатки на плавающей оправке установлено следующее:

- прокатка патрубков из стали марки 08X18H10T сопровождалась интенсивным утолщением стенки в зоне выпуска калибров в пределах от - 0,4 % до 46,8 %;
- рациональная температура прокатки труб из стали 08X18H10T составляет 1200 °С. При обеспечении данной температуры достигается минимальный уровень нагрузок на прокатную клетку и снижается угол охвата оправки металлом;
- с увеличением величины обжатия толщины стенки увеличивается поперечная разнотолщинность и появляется риск возникновения дефектов наружной поверхности;
- уменьшение угла охвата оправки металлом раската возможно путем увеличения овальности калибров за счёт увеличения их ширины. При уменьшении овальности калибра до 1,03-1,04 угол охвата увеличивается на 8° в первом проходе и

на 25,9⁰ во втором. Наименьшие показатели усилия на клеть и угла охвата оправки зафиксированы при максимальной овальности калибра 1,09.

По результатам лабораторного моделирования раскатки на контролируемо-перемещаемой оправке установлено следующее:

- двойственность действия сил трения, проявляющаяся в том, что влияние окалины на коэффициент трения при прокатке коррозионно-стойких марок стали выражено в меньшей степени, чем при прокатке углеродистых, что затрудняет условия захвата. Однако в процессе деформации слой окалины разрушается, что приводит к увеличению коэффициента трения на контакте с валками и оправкой;

- закономерности контактного трения способствуют тому, что при прочих равных условиях вероятность переполнения калибра при прокатке коррозионно-стойких марок стали ниже, чем при прокатке углеродистых марок стали. Однако угол охвата оправки при этом в случае прокатки коррозионно-стойкой марки стали выше. Поэтому важность применения качественных дезоксидирующих и смазочных материалов, а также других способов снижения коэффициента трения (например, хромирования оправок) при прокатке коррозионно-стойких марок стали повышается.

- уменьшение скорости перемещения оправки способствует снижению усилия, действующего на валки.

С учетом полученных экспериментальных данных перспективными для обеспечения прокатки труб из стали марки 08X18H10T в линии ТПА с непрерывным станом являются следующие мероприятия:

- 1) уменьшение наружного диаметра и толщины стенки гильзы с целью снижения уровня частных деформаций по клетям раскатного стана;
- 2) соблюдение рациональной температуры прокатки $T=1200^{\circ}\text{C}$;
- 3) уменьшение угла обжимной зоны калибров до значений 45-48⁰ в зависимости от клетки;
- 4) работы в направлении увеличения овальности калибров клетей черновой группы и реализации ее плавного снижения по клетям;
- 5) использование эффективных смазочных и дезоксидирующих материалов и способов их подачи;
- 6) уменьшение скорости раскатки в последних клетях для снижения межклетьевого натяжения.

Для того, чтобы оценить уровень межклетевых натяжений в соответствии с частотой вращения валков в рамках исследования впервые создана универсальная математическая модель процесса непрерывной раскатки гильз, применимая как для расчета 2-х, так и для 3-валковых калибров.

Для определения наружного контура поперечного сечения заготовки для последующих проходов общий вид наружного контура поперечного сечения деформируемого профиля на входе в очаг деформации представлен на рисунке 9.

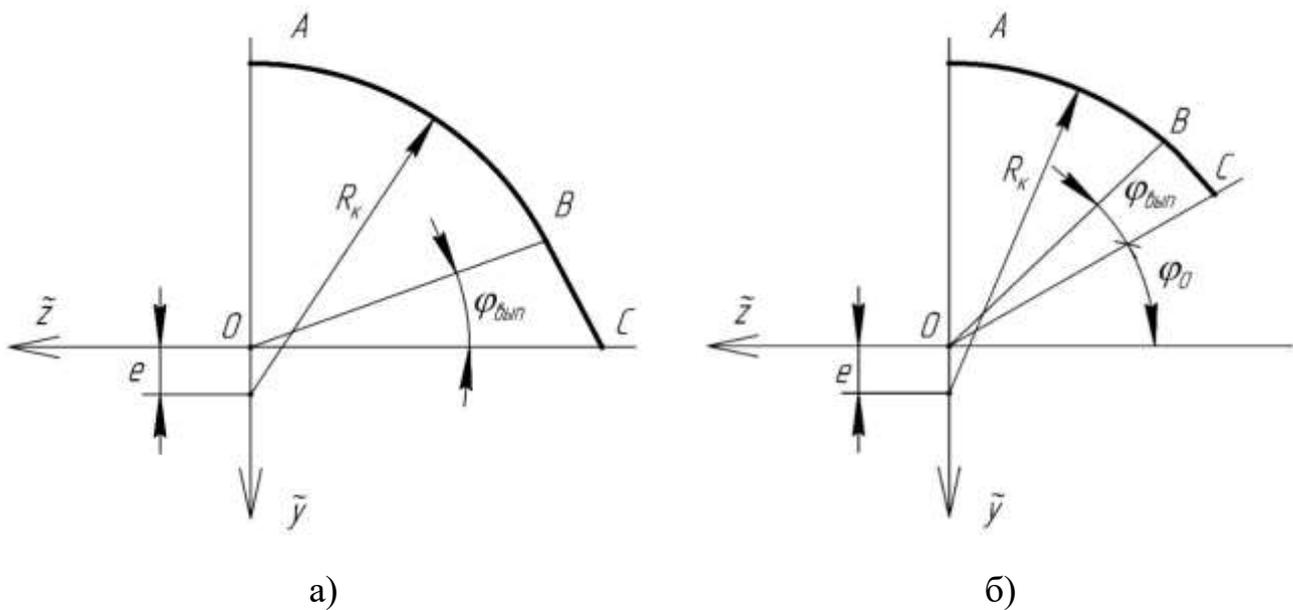


Рисунок 9 – Наружный контур заготовки для 2-х (а) и 3-валкового (б) калибра

При этом можно заметить, что схема применительно к системе 2-валковых калибров (рисунок 10а) отличается от схемы для системы 3-валковых калибров (рисунок 10б) тем, что в первом случае угол выпуска $\varphi_{\text{вып}}$ откладывается от горизонтальной оси симметрии, а во втором случае он откладывается от оси разреза калибров, наклоненной к горизонтальной оси симметрии под углом $\pi/6$. Поэтому предложено, для унификации геометрического описания очага деформации ввести угол φ_0 , характеризующий положение угла выпуска относительно горизонтальной оси симметрии. В этом случае для 2-валкового калибра $\varphi_0 = 0$, для 3-валкового калибра $\varphi_0 = \pi/6$. Такой подход в принципе позволяет исследовать и другие возможные, но в настоящее время не применяемые схемы калибровок, отличающиеся углом φ_0 .

Для определения геометрических параметров в многоклетевом непрерывном стане, выведено уравнение контура поперечного сечения заготовки для i -ой клетки:

$$\text{при } 0 \leq \tilde{z} < \tilde{z}_{B(i-1)} \quad \tilde{y} = \sqrt{R_{K(i-1)}^2 - \tilde{z}^2} - e_{(i-1)}; \quad (4)$$

$$\text{при } \tilde{z}_{B(i-1)} \leq \tilde{z} \leq \tilde{z}_{B(i-1)} [1 + \text{tg}(\varphi_{\text{вып}(i-1)} + \varphi_{0(i-1)})] \quad \tilde{y} = -\tilde{z} + \tilde{z}_{B(i-1)} [1 + \text{tg}(\varphi_{\text{вып}(i-1)} + \varphi_{0(i-1)})] \quad (5)$$

Описание контура поперечного сечения ручья калибра выполнено в системе координат zOy , связанной с осями симметрии калибра (рисунок 10).

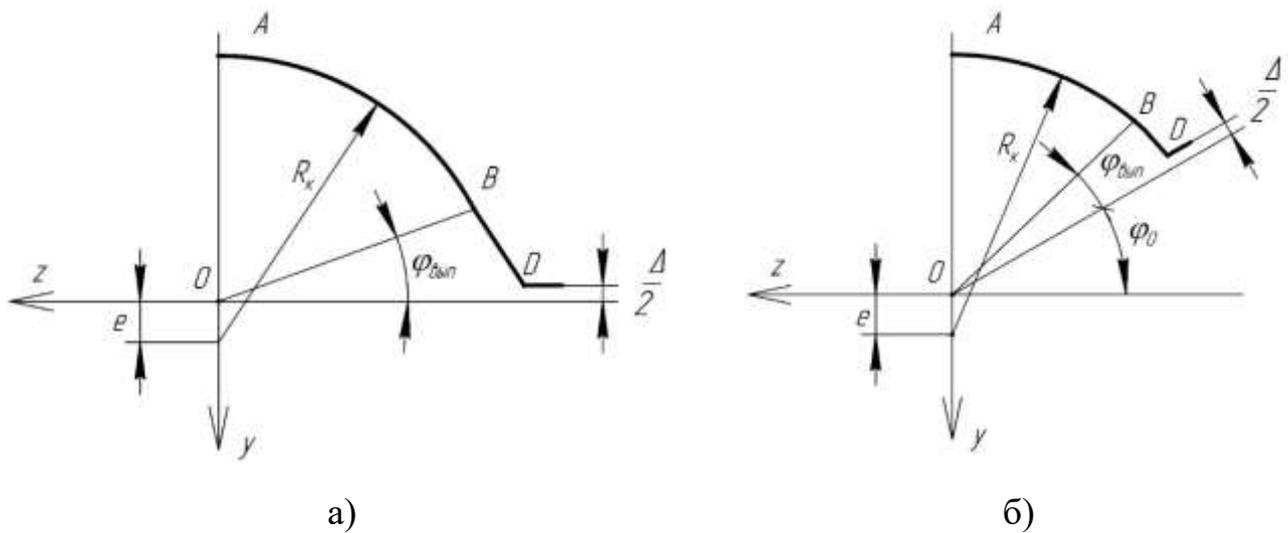


Рисунок 10 – Контур поперечного сечения ручья калибра, образованного 2-мя (а) и 3-мя (б) валками

Для определения геометрических параметров в многоклетьевом стане, выведено уравнение контура ручья калибра для i -ой клетки:

$$y = \sqrt{R_{ki}^2 - z^2} - e_i, \quad \text{при } 0 \leq z \leq z_{Bi}$$

$$y = \frac{z_{Bi}}{\sqrt{R_{ki}^2 - z_{Bi}^2}} (z_{Bi} - z) + y_{Bi} \quad \text{при } z_{Bi} < z \leq z_{Di}$$
(6)

Уравнение границы контактной поверхности очага деформации определяется как геометрическое место точек пересечения линии, описывающей наружный контур заготовки, и линии, описывающей поверхность калибра. При этом вдоль оси Oz в плоскости выхода из очага деформации можно выделить три характерных участка (рисунок 11).

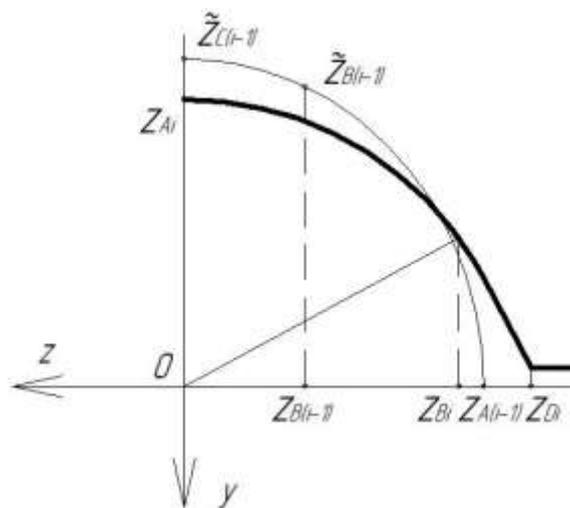


Рисунок 11 – Схема поперечного сечения заготовки и ручья калибра в плоскости выхода из очага деформации

Первый участок, для которого $0 \leq z < z_{B(i-1)}$ предполагает пересечение участка контура заготовки, сформированного в зоне выпуска ручья калибра предыдущей клетки, и радиусной зоны ручья калибра рассматриваемой клетки.

Второй участок, для которого $z_{B(i-1)} \leq z < z_{Bi}$, предполагает пересечение радиусных участков заготовки и ручья калибра.

Третий участок, для которого $z_{Bi} \leq z \leq z_{Di}$, предполагает пересечение радиусного участка заготовки с зоной выпуска калибра рассматриваемой клетки.

При расчете процессов производства труб следует иметь в виду наличие еще одной границы очага деформации, а именно поверхность контакта с оправкой. На формирование границы этой контактной поверхности оказывают влияние не только геометрические размеры прокатываемого профиля и инструмента, но и физические процессы, связанные в первую очередь с трением. Однако их учет приведет к неоправданному усложнению модели. Поэтому предлагается формула, основанная на полученной в работе экспериментальной информации, связывающая величину угла охвата оправки металлом на выходе из очага деформации с коэффициентом вытяжки μ . При этом необходимо учитывать изменение угла охвата оправки по длине очага деформации l . Проведенный анализ показал, что граница плоскости контакта деформируемого металла и оправки достаточно хорошо описывается зависимостью типа $y = \sqrt{x}$. С учетом этого, предложена следующая общая формула (как для 2-х, так и для 3-х валкового калибра) для определения текущего значения угла охвата:

$$\alpha = (\pi - 2\varphi_0)(\mu - 1)^{0,33} \sqrt{1 - \frac{x}{l}}. \quad (7)$$

С учетом этого площадь контакта деформируемого металла с оправкой может быть определена следующим образом:

$$F_{\text{оп}} = \frac{2}{3} r_{\text{оп}} l (\pi - 2\varphi_0) (\mu - 1)^{0,33} \quad (8)$$

В части кинематической модели очага деформации выполнен альтернативный вариант построения кинематически возможного поля скоростей в цилиндрической системе координат применительно к случаю прокатки в 2-валковом калибре. При этом приняты следующие гипотезы:

1) в виду того, что контур поперечного сечения валка описывается уравнением окружности, примем квадратичную зависимость изменения компоненты вектора скорости v_x по длине очага деформации;

2) поскольку при прокатке трубы на длинной оправке изгиб трубы невозможен, считаем, что компонента вектора скорости v_x изменяется только по длине очага деформации;

3) ввиду малой величины толщины стенки трубы (справедливо при производстве труб нефтяного сортамента) будем считать, что радиальная компонента

вектора скорости v_p изменяется по толщине стенки трубы по закону, близкому к линейному;

4) поскольку схема раскатки в 2-валковом калибре близка к осесимметричной, пренебрежем тангенциальной составляющей вектора скорости.

Поле скоростей построено применительно к схеме очага деформации, представленной на рисунке 12.

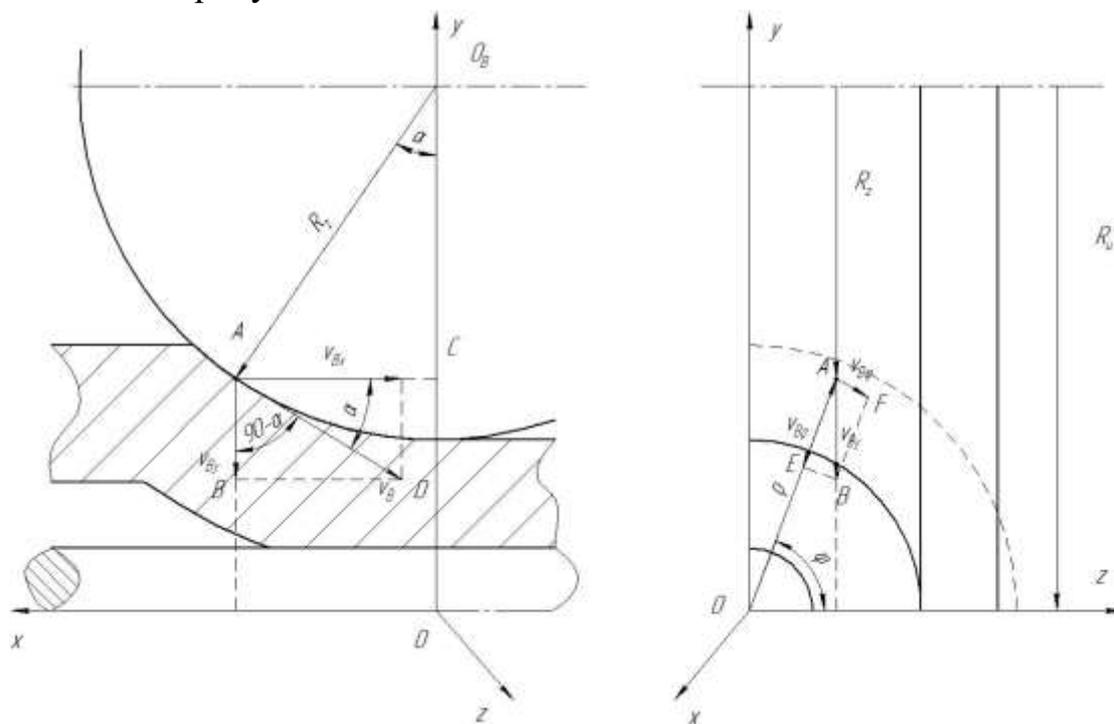


Рисунок 12 - Расчётная схема для определения кинематически возможного поля скоростей

В соответствии с принятыми гипотезами выведены уравнения для расчета продольной и радиальной составляющих вектора скорости. Аналитическое описание компонент вектора скорости необходимо для определения интенсивности скоростей деформаций сдвига H , которая, в свою очередь, используется при вычислении мощности формоизменения.

Одной из важнейших характеристик кинематики процесса прокатки является положение нейтрального сечения x_y (координата точки на контактной поверхности с равенством скоростей деформируемого металла и валка). Зная режим обжатий по клетям непрерывного стана и скоростной режим можно последовательно определить скорости перемещения металла в промежутках между клетями в соответствии с зависимостью $v_{1(i-1)} = \frac{v_{1i}}{\mu_i}$. После этого с использованием специальной выведенной формулы определяются координаты нейтрального сечения для всех клеток непрерывного стана.

В основу построения модели энергосиловых параметров положены уже известные результаты. Однако для повышения точности расчетов предложено разбить реальную форму контактной поверхности на простые фигуры и общую площадь контактной поверхности определять в виде суммы площадей этих простых фигур (рисунок 13).

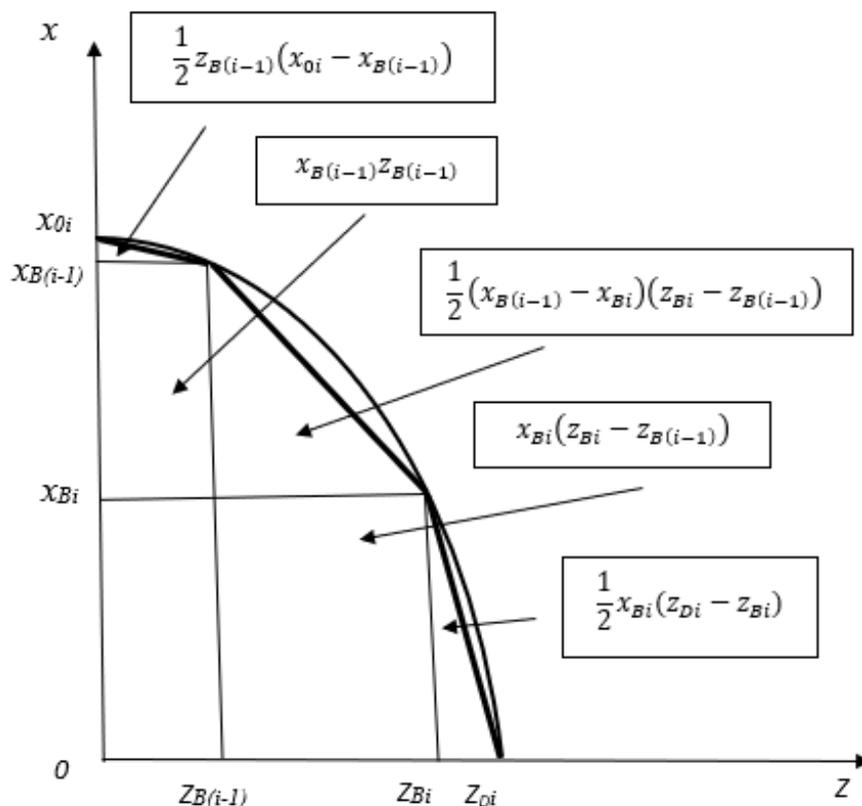


Рисунок 13 – Схема контактной поверхности с валком

Для расчета энергосиловых параметров используются известные формулы, но записанные для случая прокатки в 2-валковом калибре с учетом геометрических и кинематических особенностей, приведенных выше. При этом принимаем для определения сил контактного трения закон Зибеля $f_{\tau} = f \sigma_{scr}$.

В результате выполненных расчетов с использованием разработанной математической модели получено для условий лабораторного моделирования значение усилия прокатки, равное 6,5 кН. Среднее значение усилия прокатки, определенное при проведении эксперимента в лабораторных условиях, составило 6,34 кН. Поскольку расчетное усилие отличается от замеренного экспериментально на 2,5 %, можно сделать вывод о достаточной достоверности полученной математической модели. Результаты расчета продольных усилий, возникающих в раскатываемой гильзе в промежутках между клетями, позволяют определить степень охвата оправки деформируемым металлом и на этом основании разработать

предложения по совершенствованию калибровки валков и скоростного режима непрерывного раскатного стана.

Таким образом, предложенная математическая модель описания геометрических, кинематических и энергосиловых параметров очага деформации, позволяет с высокой точностью осуществлять расчет параметров процесса раскатки гильз в непрерывном стане на контролируемо-перемещаемой оправке. Для автоматизации расчетов создан программный продукт, который уже используется для анализа процесса раскатки в непрерывном стане МРМ АО «ВТЗ», а также внедрен в учебный процесс по профилю «Обработка металлов давлением» в ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» и в ФГБОУ ВО «ВолГТУ».

Первая опытная прокатка труб 325x16 мм из марки стали 08X18H10T по действующей технологии в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ», проведенная до выполнения описанных исследований, выявила технологическую проблему, связанную с извлечением оправки непрерывного стана при раскатке гильзы в черновую трубу. С учетом выводов, полученных по результатам компьютерного, лабораторного и математического моделирования, для решения указанной проблемы была рассчитана и предложена специальная калибровка валков непрерывного стана с овальностью $1,05 \div 1,18$ при соотношении ширины калибра к диаметру гильзы не превышающем 1,07. Благодаря большей ширине и увеличенным выпускам калибра, извлечение оправки непрерывного стана в момент раскатки осуществляется при штатных нагрузках на рейку.

В седьмой главе приведены результаты внедрения сквозной технологии прокатки сверленных НЛЗ из коррозионно-стойких марок стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой.

Раскатка гильз в черновую трубу в непрерывном стане продольной прокатки может считаться осесимметричным технологическим процессом. На практике ось непрерывного стана может отклоняться от нормативных допусков (как правило, не более 0,5 мм) ввиду износа станин, посадочных мест клетей, опорных и регулировочных пластин. В условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ» разработана и внедрена универсальная методика способа контроля оси непрерывного стана с использованием современного оборудования – лазерного трекера API Tracker 3. Техническая задача, решаемая данным способом, заключается в улучшении прямолинейности прокатываемых на станах продольной прокатки труб за счёт контроля положения и устранения смещения станин клетей, нажимных винтов и прокатных валков от оси прокатки.

Наравне с выверенным положением оси стана, важнейшим фактором повторяемости технологии и обеспечения геометрических параметров труб является жесткость станин и надежность их крепления к фундаментам. Крепление осуществляется на шпильках и для обеспечения надежности затяжки гайки на

шпильке требуется усилие с определенным моментом. Разработано и применяется усовершенствованное специальное оборудование – шпильконатяжитель.

Внедрение методики способа контроля соосности клетей станов продольной прокатки и конструкции шпильконатяжителя для обеспечения жесткости стана, позволили снизить расход металла в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ» на 4 кг/т.

Проведенный комплекс исследований с применением классических научных подходов, результаты которых приведены в главах 2-6, позволил впервые сформулировать теоретические основы новой технологии прокатки бесшовных товарных труб из непрерывно-литых заготовок коррозионно-стойких марок стали. Новая технология в условиях ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой позволяет осуществлять прокатку длинномерных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали с высоким качеством внутренней и наружной поверхности, а также требуемым набором эксплуатационных свойств.

В период 2018-2022 годы в ТПЦ-3 АО «ВТЗ» прокатано и отгружено потребителям свыше 4000 т труб из марок стали группы 13Cr, и свыше 300 т труб из марки стали 08X18H10T. Тем самым созданы предпосылки для импортозамещения, расширения сортамента и локализации производства горячекатаных труб из коррозионно-стойких марок стали, что способствует обеспечению стратегической безопасности нефтяной и атомной промышленности Российской Федерации.

Суммарный экономический эффект от внедрения новых технологических решений, полученных по результатам диссертационной работы в условиях действующего промышленного производства составил более 100 млн рублей. Расчет экономического эффекта основан на определении прибыли, получаемой предприятием при производстве нового вида продукции за счет внедрения новой технологии прокатки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе на основе результатов математического и компьютерного моделирования, лабораторных и промышленных экспериментов сформулированы теоретические основы и создан комплекс технологических решений, направленные на разработку и освоение новой технологии по получению высококачественных бесшовных труб из коррозионно-стойких марок стали с применением непрерывно-литой заготовки и трубопрокатного агрегата с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой:

1. Выявлены отличительные особенности пластических и прочностных свойств коррозионно-стойких марок стали аустенитного класса, а также исследована трансформация свойств коррозионно-стойкой марки стали на различных переделах в

линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой. Построены диаграммы пластичности, выведена формула для определения сопротивления пластической деформации стали марки 08X18H10T.

2. Сформулированы требования к составам применяемых при прокатке труб дезоксиданта и графитовой смазки, обеспечивающие высокое качество внутренней поверхности труб из коррозионно-стойких марок стали, а также высокую стойкость контролируемо-перемещаемых оправок. Даны рекомендации по способу подачи указанных смазок к контактирующим поверхностям и требования к оборудованию для подачи. Впервые исследовано влияние дезоксиданта и графитовых смазок на коэффициенты контактного трения при прокатке труб из коррозионно-стойких марок стали и установлено, что на контактной поверхности трубы и валка коэффициент контактного трения составляет 0,47, а на контактной поверхности трубы и оправки 0,38.

3. С использованием программного комплекса QForm 3D проведено моделирование процесса прошивки как полой непрерывно-литой, так и сплошной ковальной заготовки из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса. Установлено, что для прокатки труб целесообразно использовать полую непрерывно-литую заготовку.

4. Разработана технология подготовки непрерывно-литой заготовки из коррозионно-стойких марок стали, позволяющая устранить недостатки литой структуры металла, и обеспечить высокое качество бесшовных труб, получаемых прокаткой на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой.

5. Применение оправок с высокой износостойкостью в совокупности с другими техническими решениями при прокатке заготовок из коррозионно-стойких марок стали, позволило увеличить часовую производительность участка горячего проката ТПА 159-426 АО «ВТЗ» более, чем в 2 раза в сравнении с ранее достигнутой.

6. По результатам компьютерного, лабораторного и математического моделирования процесса раскатки гильз из коррозионно-стойкой марки стали 08X18H10T в непрерывном стане продольной прокатки установлено, что для обеспечения стабильного извлечения контролируемо-перемещаемой оправки при допустимых нагрузках на рейку механизма удержания оправки необходимо использовать калибровку, отличающуюся увеличенной шириной и увеличенными выпусками калибра с овальностью $1,05 \div 1,18$.

7. Разработана и внедрена методика способа контроля соосности клеток непрерывных станов продольной прокатки, а также техническое решение по обеспечению повышенной жесткости станов ТПА за счет повышения надежности крепления клеток к фундаментам, что позволило снизить расход металла в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ» на 4 кг/т.

8. Впервые внедрена в промышленное производство новая наукоемкая сквозная технология прокатки непрерывно-литых заготовок в условиях ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой, обеспечивающая высокое качество внутренней и наружной поверхности труб из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса.

9. Суммарный экономический эффект от внедрения новых технологических решений, полученных по результатам диссертационной работы в условиях действующего промышленного производства, составил более 100 млн рублей.

10. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», а также кадров высшей квалификации по профилю «Обработка металлов давлением» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ И ИЗДАНИЯХ:

Монографии:

1. Основы металловедения и технологии производства труб из коррозионно-стойких сталей: монография / Пумпянский Д.А., Пышминцев И.Ю., Выдрин А.В., Кузнецов В.И., Красиков А.В. - М.: Издательство Metallurgizdat, 2023. – 682с.

Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ:

2. Освоение производства бесшовных труб из нержавеющей стали мартенситного класса марки типа 13Cr на ТПА 159-426 АО ВТЗ. / Трутнев Н.В., Красиков А.В., Ульянов А.Г., Лубе И.И., Космацкий Я.И., Корсаков А.А. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. №12. С.68-71.

3. Повышение стойкости оправок прошивного стана при производстве бесшовных труб из нержавеющей стали мартенситного класса марки типа 13Cr в линии ТПА 159-426 АО ВТЗ. / Лубе И.И., Трутнев Н.В., Тумашев С.В., Красиков А.В., Ульянов А.Г., Корсаков А.А., Космацкий Я.И. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т.76. №12. С.1259-1264.

4. Освоение технологии прокатки труб из нержавеющей стали. / Трутнев Н.В., Выдрин А.В., Бунышин М.В., Красиков А.В., Черных И.Н., Звонарев Д.Ю., Ульянов А.Г. // СТАЛЬ. 2021. №2. С.35-38.

5. Разработка математической модели и компьютерной программы для расчета энергосиловых параметров процесса обжата непрерывнолитых заготовок на трехвалковых станах винтовой прокатки. / Корсаков А.А., Михалкин Д.В., Заварцев Н.А., Красиков А.В., Тыщук И.Н., Байков В.В. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т.77. №1. С.55-62.

6. Смазочно-дезоксирующие материалы и оборудование для их подачи в линиях ТПА с непрерывными станами. / Кузнецов В.И., Красиков А.В., Выдрин А.В. [и др.]. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2021. Т.21. №2. С.42-50.

7. Технология подготовки непрерывно-литой заготовки из нержавеющей марки стали к прокатке на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой. / Красиков А.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2021. Т.21. №3. С.40-48.

8. Повышение эффективности производства и качества труб на основе решения трибологических проблем. / Кузнецов В.И., Выдрин А.В., Красиков А.В., Кривошеев А.А., Пашнина Е.Ю., Соколов Д.К., Нерозников В.Л. // СТАЛЬ. 2022. №1. С.28-34.

9. Разработка конструкции для контроля вдуваемой массы смазочно-дезоксирующего материала. / Кузнецов В.И., Кривошеев А.А., Красиков А.В. [и др.]. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т.22. №2. С.74-85.

10. Освоение производства непрерывнолитой заготовки из стали 08X18H10T для изготовления горячекатаных и прессованных труб. / Трутнев Н.В., Красиков А.В., Кузнецов В.Ю., Морозов В.В., Войтенко Р.М. // СТАЛЬ. 2022. №5. С.8-12.

11. Экспериментальное исследование процессов дефектообразования при редуцировании труб. / Черных И.Н., Гейм Е.А., Нифантьев П.Н., Ульянов А.Г., Красиков А.В., Тыщук И.Н. // СТАЛЬ. 2023. №2. С.27-29.

12. Сравнительное исследование процесса прошивки сверленной и сплошной заготовки. / Красиков А.В., Выдрин А.В., Звонарев Д.Ю., Корсаков А.А., Ульянов А.Г., Денисюк С.А. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т.23. №1. С.30-37.

13. Основы технологии прокатки товарных труб специального назначения из труднодеформируемых марок стали на агрегатах с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой. / Красиков А.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т.23. №2. С.14-22.

Публикации в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus:

14. Technological development of the rolling of stainless steel pipes. / Trutnev N.V., Vydrin A.V., Bunyashin M.V., Krasikov A.V., Chernykh I.N., Zvonarev D. Yu., Ulyanov A.G. // Steel in Translation. 2021. Vol. 51(2). P.131-134.

15. Исследование условий работы линейек прошивного стана с использованием компьютерного моделирования. / Корсаков А.А., Михалкин Д.В., Ахмеров Д.А., Красиков А.В., Ульянов А.Г. // МЕТАЛЛУРГ. 2022. №1. С.32-39.

16. Требования к графитосодержащим смазкам и оборудованию для нанесения на контролируемо-перемещаемую оправку при изготовлении труб из нержавеющей марки стали в линии непрерывного стана. / Кузнецов В.И., Красиков А.В., Кривошеев А.А. [и др.]. // Черные металлы. 2022. №2. С.23-28.

17. Improving production efficiency and quality of pipes based on solving tribotechnical problems. / Kuznecov V.I., Vydrin A.V., Krasikov A.V., Krivosheev A.A., Pashina E.U., Sokolov D.K., Neroznikov V.L. // Steel in Translation. 2022. Vol. 52(1). P.113-120.

18. Forecasting procedure for strength and ductile properties of alloy steel pipes in process of manufacturing and operation. / Vydrin A.V., Krasikov A.V., Zhukov A.S., Zvonarev D.Y., Bunyashin M.V. // Procedia Structural Integrity. 2022. Vol. 40. P.450-454.

19. Study of the operating conditions of piercing mill shoes using computer modeling. / Korsakov A.A., Mikhalkin D.V., Akhmerov D.A., Krasikov A.V., Ulyanov A.G. // Metallurgist. 2022. Vol. 66(1-2). P.33-44.

20. Development of production of continuous cast billets of grade 08Kh18N10T steel for fabricating hot-rolled and pressed pipes. / Trutnev N.V., Krasikov A.V., Kuznecov V.U., Morozov V.V., Voitenko R.M. // Steel in Translation. 2022. Vol. 52(5). P.509-514.

21. Experimental studies of defect formation during pipe reducing. / Chernykh I.N., Geim E.A., Nifantev P.N., Ulyanov A.G., Krasikov A.V., Tyshchuk I.N. // Steel in Translation. 2023. Vol. 53(2). P.168-171.

Публикации в иных изданиях:

22. Повышение износостойкости оправок непрерывных станов при раскатке труб. / Вавилкин Н.М., Красиков А.В. // Труды X международного конгресса прокатчиков. 2015. Т.2. С.164-168.

23. Особенности раскатки труб в двух- и трехвалковых клетях непрерывных станов на контролируемо-перемещаемой оправке. / Романцев Б.А., Вавилкин Н.М., Лубе И.И., Красиков А.В. // Бюллетень «Черная металлургия». 2016. №8. С.58-61.

24. Оценка технической возможности снижения усилия прессования труб в условиях ТПЦ-2 АО «ВТЗ» за счет применения новых технических решений. / Космацкий Я.И., Фокин Н.В., Тумашев А.С., Ананян В.В., Красиков А.В. // Труды XXII МНПК «Трубы-2016». 2017. С.231-237.

25. Минимизация трудноудаляемых образований на внутренней поверхности труб. / Кузнецов В.И., Кривошеев А.А., Соколов Д.К., Пьянков Б.Г., Панасенко О.А., Пьянков К.П., Нерозников В.Л., Головенко А.А., Красиков А.В., Ульянов А.Г. // Труды XXIII МНПК «Трубы-2018». 2018. С.128-132.

26. Совершенствование технологии производства насосно-компрессорных труб из сплава «ТМК-С». / Фокин Н.В., Космацкий Я.И., Выдрин А.В., Баричко Б.В., Красиков А.В. // Труды XXIII МНПК «Трубы-2018». 2018. С.121-124.

27. Comparative Analysis of Glass-Lubricating Materials Applied During the Pipe's Hot-Extrusion. /Yaroslav Igorevich Kosmatskiy, Andrey Krasikov, Aleksander Tumashev // TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science. Vol. 64(2-4). June 2020. P.284-288.

28. Extending the life of piercing plugs. / Lube I.I., Krasikov A.V., Vydrin A.V., Korsakov A.A. // Steel Times International. 2021. Vol. 45(2). P.33-35.

29. Увеличение износостойкости прошивных оправок при производстве бесшовных труб из нержавеющей марки стали на ТПА с непрерывным станом. / Красиков А.В., Корсаков А.А. // Труды XXIV МНПК «Трубы-2021». 2022. Т.2. С.19-22.

30. Разработка и реализация технологии обжатия НЛЗ из нержавеющей марки стали аустенитного класса в стане Ассела. / Корсаков А.А., Михалкин Д.В., Красиков А.В., Ульянов А.Г., Байков В.В. // Труды XXIV МНПК «Трубы-2021». 2022. Т.2. С.5-10.

31. Технология прокатки товарных труб специального назначения из труднодеформируемых марок стали на агрегатах с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой. / Красиков А.В. // Труды XIII международного конгресса прокатчиков. 2022. Т.1. С.109-115.

32. Опыт использования ТПА со станом Ассела для обжатия заготовок из нержавеющей марки стали. / Корсаков А.А., Михалкин Д.В., Красиков А.В., Ульянов А.Г., Байков В.В. // Труды XIII международного конгресса прокатчиков. 2023. Т.2. С.312-317.

33. Исследование износостойкости оправок при прошивке заготовок из стали 20Х13. / Корсаков А.А., Михалкин Д.В., Красиков А.В., Алещенко А.С., Гамин Ю.В., Банников А.И., Чемаева Я.А., Михалкина Е.Ю. // Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов». 2023. №21. С.1-8.

Охранные документы:

34. Пат. 2692683 Российская Федерация, МПК В21В38/00, В21В38/10. Способ контроля соосности клеток станов продольной прокатки / Н.В. Трутнев, А.В. Никляев, А.В. Красиков [и др.]. - № 2018104758/04; опубл. 26.06.19.

35. Пат. 2703767 Российская Федерация, МПК С22С 38/50, F16L 9/02. Труба нефтяного сортамента из коррозионно-стойкой стали мартенситного класса / И.Ю. Пышминцев, С.М. Битюков, А.В. Красиков [и др.]. - № 2018120345; опубл. 22.10.19.

36. Пат. 2713531 Российская Федерация, МПК В21В 17/02. Способ непрерывной прокатки труб / А.В. Выдрин, И.Ю. Пышминцев, А.В. Красиков [и др.]. - № 2019110232; опубл. 05.02.20.

37. Пат. 2751069 Российская Федерация, МПК В21В 17/02. Способ производства бесшовных труб из нержавеющей стали мартенситного класса типа 13Cr / Д.А. Пумпянский, С.Г. Четвериков, А.В. Красиков [и др.]. - № 2020132174; опубл. 07.07.21.
38. Пат. 2787205 Российская Федерация, МПК С21D 8/105. Бесшовная высокопрочная труба из стали мартенситного класса для обсадных колонн и способ ее производства / Д.А. Пумпянский, И.Ю. Пышминцев, А.В. Красиков [и др.]. - №2021103723; опубл. 29.12.22.
39. Пат. 2788284 Российская Федерация, МПК В21В 19/04. Способ производства бесшовных горячедеформированных коррозионно-стойких труб из стали аустенитного класса / Д.А. Пумпянский, С.Г. Четвериков, А.В. Красиков [и др.]. - №2022105681; опубл. 17.01.23.
40. Пат. 2794330 Российская Федерация, МПК В21С 23/08. Способ изготовления горячепрессованных труб из стали типа 13Cr / С.Г. Чикалов, И.Ю. Пышминцев, А.В. Красиков [и др.]. - № 2022125844; опубл. 17.04.23.
41. Пат. 2807155 Российская Федерация, МПК В21В 25/00. Оправка стана винтовой прокатки для прошивки заготовок из легированных, высокохромистых и нержавеющей марок стали / Н.В. Трутнев, А.В. Красиков, А.В. Выдрин [и др.]. - №2022114559; опубл. 09.11.23.
42. Пат. (заявка №2022114558 от 30.05.2022г, решение о выдаче патента от 31.07.2023) Российская Федерация, МПК В21В 17/02. Способ винтовой прошивки и устройство для его осуществления / В.И. Кузнецов, А.В. Выдрин, А.В. Красиков [и др.].
43. Пат. 2808491 Российская Федерация, МПК В21В 17/04. Устройство для вдувания смазочно-дезоксирующего материала на внутреннюю поверхность гильзы / В.И. Кузнецов, И.Ю. Пышминцев, А.В. Красиков [и др.]. - №2023103824; опубл. 28.11.23.
44. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2020617889. Reduction motor load / А.А. Корсаков, Д.В. Михалкин, А.В. Красиков [и др.]. Дата гос. регистрации 15.07.2020.
45. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2020663207. КорХ3 / А.А. Корсаков, Д.В. Михалкин, А.В. Красиков [и др.]. Дата гос. регистрации 23.10.2020.

Красиков Андрей Владимирович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ
ТОВАРНЫХ ТРУБ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ МАРОК СТАЛИ
НА АГРЕГАТАХ С НЕПРЕРЫВНЫМИ СТАНАМИ
С КОНТРОЛИРУЕМО-ПЕРЕМЕЩАЕМОЙ ОПРАВКОЙ

Специальность 2.6.4 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 06.02.2024. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 14/43.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.