

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

МАХМУД АЛХАЖ АЛИ АБДУЛЛА

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМО-
ДЕФОРМАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ
ПРУТКОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-
ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Гамин Юрий Владимирович

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Развитие техники предъявляет к конструкционным металлическим материалам все более строгие требования по комплексу механических и эксплуатационных свойств, которые могут быть получены только при строгом соблюдении технологических режимов обработки и четком контроле всех этапов производства, начиная от химического состава материала и до конечного изделия. Уникальные свойства титана и существующих сплавов на его основе определили применимость и востребованность этого конструкционного материала во многих отраслях. Вместе с тем, производство деформированных полуфабрикатов относится к трудоемким и дорогостоящим процессам из-за относительно высокого сопротивления титановых сплавов деформации, взаимодействия титана с газами окружающего пространства, его низкой теплопроводности и др. Ввиду описанных выше особенностей контроль макро- и микроструктуры и свойств является сложной задачей при производстве деформированных полуфабрикатов из сплавов титана, а поскольку тип и параметры структуры часто оказывают решающее влияние на уровень механических и эксплуатационных свойств, эта задача является одной из важнейших и актуальных. Известно, что радиально-сдвиговая прокатка (РСП) прутков из титановых сплавов с регламентированными свойствами, в особенности среднего и мелкого сортамента является непростой задачей, что связано с полиморфизмом многих промышленных марок сплавов, образованием температурного клина и неравномерности температурного поля по сечению, быстрым остыванием прутков небольшого сечения в процессе РСП и др. Несмотря на большое количество исследований, посвященных титановым сплавам, и технологиям их обработки, на данный момент отсутствуют удобные инструменты и цифровые модели (ЦМ), позволяющие рассчитать рациональные режимы прокатки и описывающие взаимосвязь формирующихся структуры и термодеформационных режимов для прутков малого диаметра непосредственно в условиях действующих производств.

Все вышесказанное отражает перспективность и актуальность темы исследования.

Целью работы является комплексное исследование и совершенствование термо-деформационных режимов процесса радиально-сдвиговой прокатки прутков из титанового сплава ВТЗ-1 на основе конечно-элементного моделирования.

Для достижения цели в работе поставлены следующие **основные задачи**:

- провести экспериментальное исследование параметров радиально-сдвиговой прокатки прутков из титанового сплава ВТЗ-1 и сбор экспериментальных данных с помощью разработанной системы мониторинга;
- выполнить анализ макроструктуры и микроструктуры, особенностей формоизменения экспериментальных образцов и оценку вклада основных технологических параметров в формирование структуры;
- на основе полученных экспериментальных данных разработать и верифицировать цифровую модель процесса РСП в среде QForm 3D;
- провести комплексное компьютерное моделирование методом конечных элементов процесса РСП в широком диапазоне температурных, деформационных, скоростных параметров и геометрических размеров заготовок, установить зависимость температурных параметров от данных факторов;
- на основе результатов МКЭ-моделирования и алгоритмов машинного обучения разработать предиктивную модель температурно-деформационных параметров процесса РСП прутков диаметром 18...60 мм из сплава ВТЗ-1;
- разработать рекомендации по совершенствованию термо-деформационных режимов РСП на основе результатов экспериментов, расчетов и возможностей регулирования температуры за счет скоростного режима прокатки.

Научная новизна

- получен и систематизирован массив экспериментальных и расчетных данных о параметрах деформации методом РСП, в частности распределение температуры и накопленной степени деформации по сечению и длине прутков, токовая нагрузка

на привод, скоростные параметры (машинное время прокатки и условия скольжения в очаге деформации) и характеристики структуры: балл макрозерна по сечению и длине проката, тип микроструктуры для прутков диаметром 18...60 мм из сплава ВТЗ-1;

- установлены количественные закономерности, в виде полиномов второй степени, влияния температуры нагрева, коэффициента вытяжки, частоты вращения валков и длины заготовки на формирование температурного поля прутка с учетом продольной и поперечной неравномерности;

- на основе конечно-элементного моделирования (более 90 вариантов) и методов машинного обучения впервые создана предиктивная модель температурно-деформационных параметров процесса РСП прутков диаметром 18...60 мм из сплава ВТЗ-1, позволяющая оперативно определять изменение температуры и накопленной степени деформации по сечению и длине проката в зависимости от размеров заготовки и факторов процесса;

- установлено, что ступенчатое увеличение частоты вращения валков в диапазоне 60...120 об/мин в процессе РСП в зависимости от температуры прутка на выходе из валков позволяет управлять температурным полем прутка, поддерживая более равномерную температуру по длине и сократить машинное время прокатки на 31...44 % за счет повышения осевой скорости прокатки.

Практическая значимость

- создана и апробирована на станах РСП система мониторинга процесса на базе ИК-пирометров, устройства фиксации токовой нагрузки на привод и машинного времени прокатки, интерфейса SCADA и преобразователей частоты, позволяющая в реальном времени выполнять управление приводом через обратную связь в зависимости от показателей температуры прутка;

- предложена предиктивная модель для оперативного прогнозирования конечной температуры и накопленной степени деформации для рациональной настройки технологического процесса на промышленных станах РСП для двухфазных титановых сплавов;

- в опытно-промышленных условиях уточнены и опробованы рациональные термо-деформационные режимы радиально-сдвиговой прокатки прутков из сплава ВТЗ-1, обеспечивающие получение равномерной мелкозернистой макроструктуры (1...2 балла) и необходимого типа микроструктуры (глобулярной, бимодальной глобулярно-пластинчатой или переходной);

- разработана методика выбора скоростного режима РСП на основе полученных регрессионных зависимостей, позволяющая минимизировать перепад температуры по длине и сечению проката;

- результаты проведенных исследований используются в учебном процессе при подготовке студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлениям подготовки 22.03.02 и 22.04.02 «Металлургия» и 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» на кафедре ОМД НИТУ МИСИС.

Методы исследований

Экспериментальные исследования проводились на опытно-промышленных трёхвалковых станах винтовой прокатки МИСиС-130Т, МИСиС-100Т и министане 14-40. Температуру поверхности фиксировали ИК-пирометрами «Кельвин RXR-Pro 1600» с предварительной тарировкой, токовую нагрузку – через частотные преобразователи с записью в системе SCADA. Микроструктуру и макроструктуру изучали методом оптической микроскопии (Carl Zeiss Axio Lab.A1). Диапазон полиморфного превращения определяли дилатометрическим методом испытаний на закалочно-деформационном дилатометре DIL 805 A/D. Конечно-элементное моделирование выполняли в программном комплексе QForm 3D v11 с использованием теплофизических и реологических свойств сплава ВТЗ-1, заданных для диапазона параметров деформирования. Для обработки данных и создания предиктивной модели применяли методы машинного обучения (RandomForest, ExtraTrees, GradientBoosting, XGBoost, LightGBM, SVR) с настройкой гиперпараметров через библиотеку Optuna и оценкой точности по метрикам RMSE, MAE, MAPE, R^2 .

Положения, выносимые на защиту

1) Результаты экспериментального исследования влияния температуры прокатки, коэффициента вытяжки, частоты вращения валков и длины заготовки на формирование температурного поля поверхности прутков из сплава ВТЗ-1, а также на эволюцию макроструктуры и микроструктуры по сечению и длине прутков.

2) Верифицированная конечно-элементная модель процесса радиально-сдвиговой прокатки прутков из двухфазных титановых сплавов, адекватно описывающая температурное поле, формоизменение и геометрические размеры прутка, временные параметры с погрешностью не более 10 %.

3) Предиктивная модель для оперативного расчета конечной температуры и накопленной степени деформации в любой точке поперечного сечения прутка в зависимости от начальных технологических параметров (диаметр и длина заготовки, конечный диаметр прутка, коэффициент вытяжки, частота вращения валков, температура нагрева заготовки).

4) Методика управления температурным полем при РСП прутков малого диаметра путём изменения частоты вращения валков в процессе прокатки, обеспечивающая повышение средней температуры прутка на выходе, снижение перепада температур по длине и сокращение машинного времени прокатки.

Достоверность научных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- применением аттестованного и калиброванного экспериментального оборудования (ИК-пирометры с предварительной тарировкой для титановых сплавов, система SCADA, дилатометр, оптический микроскоп);
- большим объёмом экспериментальных данных (59 режимов прокатки на трёх типоразмерах станов, более 100 металлографических образцов);
- использованием современных методов конечно-элементного моделирования с учётом температурной зависимости теплофизических и реологических свойств, а также высокой сходимостью расчётных и экспериментальных данных и воспроизводимостью результатов;

- применением статистических методов анализа и машинного обучения с разделением выборок на обучающую, тестовую и валидационную, а также оценкой точности моделей по нескольким метрикам.

Текст диссертации проверен на оригинальность с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

Личный вклад автора состоит в определении цели исследования и постановке задач, разработке плана экспериментальных исследований, выполнении комплексного компьютерного моделирования и анализа результатов, пробоподготовке образцов и проведении металлографического анализа, разработке предложений по совершенствованию термо-деформационных режимов радиально-сдвиговой прокатки прутков из титанового сплава.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов, 22-26 октября 2024 года, г. Москва, Россия; Научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК им. С.З. Афонина, 3–5 декабря 2025, г. Выкса, Россия. Исследования, выполненные в рамках темы диссертации, отмечены дипломами конкурса «Молодые ученые 2024» и «Молодые ученые 2025» международной промышленной выставки «Металл-Экспо».

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 3 печатных работах, рекомендованных Перечнем ВАК и индексируемых в базах Web of Science и/или Scopus, 2 тезисах докладов в сборниках научных конференций.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация по своей тематике, цели, задачам, научной новизне, теоретической и практической значимости, методам исследования, положениям, выносимым на защиту, соответствует паспорту специальности 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением по пунктам 1, 3, 8.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, а также списка литературы из 120 источников. Работа изложена на 148 страницах, содержит 77 рисунков и 25 таблиц, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость, перечислены методы, использованные для выполнения работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первой главе представлен литературный обзор особенностей технологии РСП и её применении для получения полуфабрикатов из двухфазных титановых сплавов, а также рассмотрены алгоритмы управления процессами ОМД и применение цифровых моделей для оптимизации технологических процессов.

В главе проанализированы основные факторы, определяющие качество и точность прутков, полученных способом РСП, обоснована актуальность создания расчетных моделей для управления процессом РСП.

Описаны свойства двухфазного титанового сплава ВТЗ-1 и области его применения, а также особенности формирования его структуры и свойств. Кроме того, проведен анализ особенностей деформации двухфазных титановых сплавов методом РСП, выявлены основные факторы, влияющие на формирование температурного поля прутка в процессе прокатки.

Также проведён обзор применения цифровых моделей для совершенствования процессов деформации, направленных на повышение их эффективности и обеспечение управляемостью технологическими параметрами в условиях прокатного производства.

Во второй главе выполнена разработка методики экспериментального исследования, приведено описание оборудования, а также сформирован план экспериментов и методики обработки данных.

В научно-производственном центре ОМД НИТУ МИСИС проводилась экспериментальная прокатка на опытно-промышленных трехвалковых станах винтовой прокатки МИСиС-130Т и МИСиС-100Т, министане винтовой прокатки 14-40. Оборудование оснащено преобразователями частоты для получения требуемой информации о фактических значениях частоты вращения валков, времени прокатки и токовой нагрузки на электродвигатель.

Разработана система мониторинга характеристик процесса прокатки, схема которой приведена на рисунке 1, а.

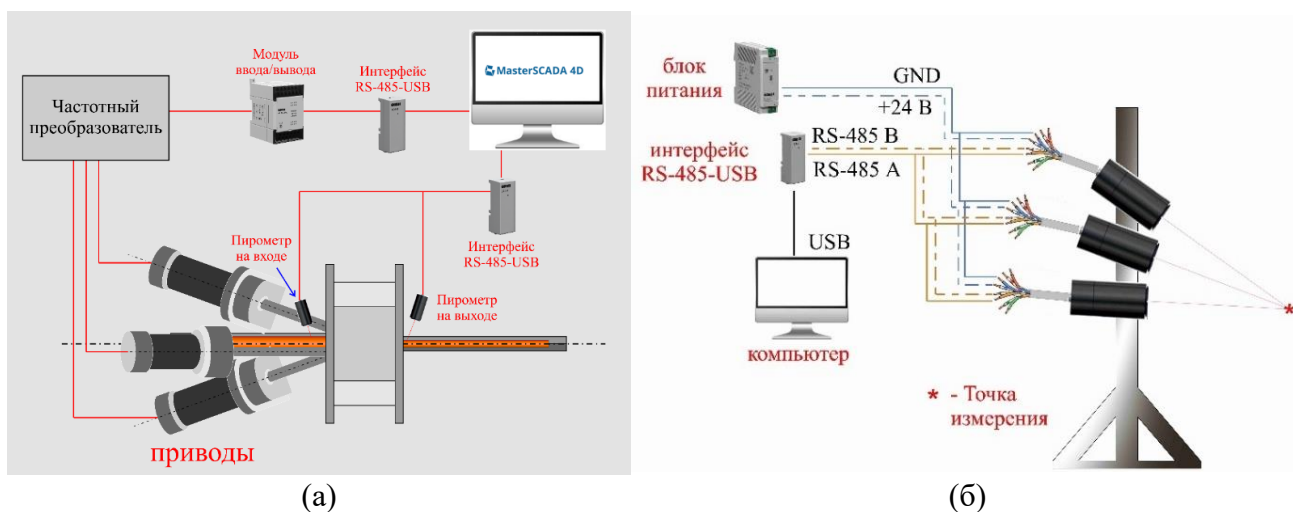


Рисунок 1 – Схема подключения системы мониторинга (а) и схема подключения ИК-пирометров для тарирования (б)

Система мониторинга включает ИК-пирометры, предназначенные для измерения температуры поверхности заготовки на входе в очаг деформации (ОД) и на выходе из ОД. Для сбора данных о частоте вращения валков, времени прокатки и изменения тока электродвигателей главного привода в процессе прокатки был

использован модуль аналогового ввода с быстрыми входами (AI) типа «ОВЕН MB110-хАС», подключённый к преобразователю частоты. Все полученные данные отображаются в виде графиков в программной среде SCADA, которая обеспечивает сохранение информации в табличной форме для последующего анализа и визуализации. Данные, полученные с помощью системы мониторинга, предназначены не только для анализа характеристик процесса РСП, но и служат основой для создания и дальнейшей верификации цифровой модели.

В рамках подготовки системы мониторинга проводилась экспериментальная тарировка датчиков температуры (рисунок 1, б). Экспериментально определены коэффициенты излучения образцов из титановых сплавов BT3-1 и BT6 в диапазоне температур 900...1200 °С (таблица 1). Процесс тарировки проводился на трех пирометрах, из которых для дальнейшего использования выбраны два.

Таблица 1 – Коэффициенты излучения для сплавов BT3-1 и BT6

Температура нагрева образца, °С	Коэффициент излучения	
	BT3-1	BT6
900	0,60	0,50
1000	0,53	0,63
1100	0,53	0,63
1200	0,57	0,63

В соответствии с целью и задачами исследования был разработан план экспериментальной прокатки (рисунок 2), предусматривающий варьирование и изучение влияния таких параметров, как температура прокатки, скорость прокатки (частота вращения рабочих валков), коэффициент вытяжки, длина заготовки, и количество проходов.

План эксперимента состоит из трёх основных этапов, на каждом из которых прокатка проводится на одном из трех типоразмеров прокатных станов. После каждого этапа от концов прутков отрезались утяжки и темплеты для изучения макро- и микроструктуры.

Таким образом, всего реализовано 59 экспериментальных вариантов прокатки. Для обеспечения равномерности распределения параметров выбранных режимов

прокатки в области их исследования были построены графики на основе латинского гиперкуба в плоском представлении. Показано, что выбранные диапазоны основных режимов прокатки достаточно полно покрывают поле распределения, что говорит о их равномерности для всей области исследуемых параметров.

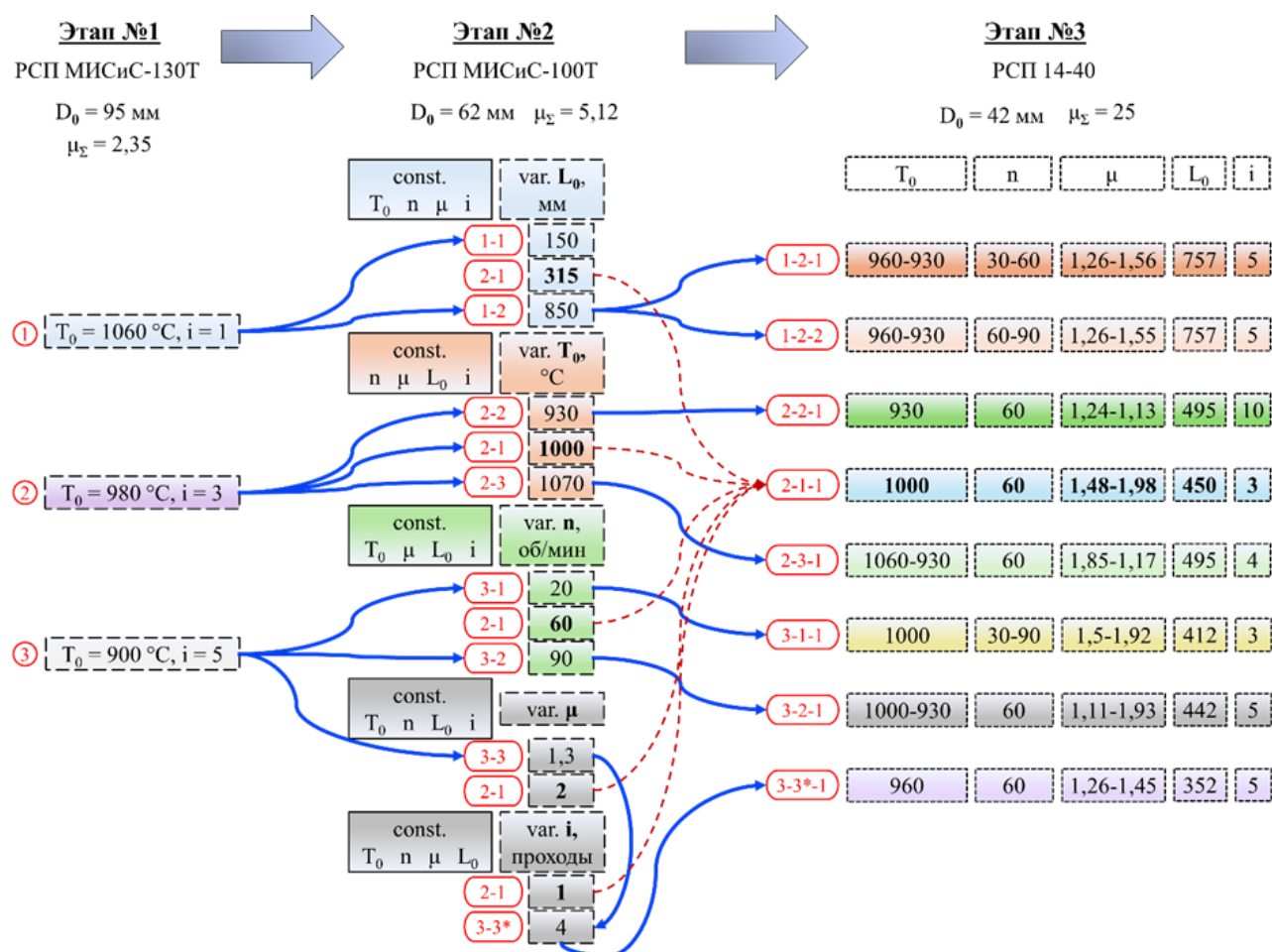


Рисунок 2 – Схема плана экспериментального исследования

Третья глава посвящена описанию результатов экспериментальных исследований, а также комплексному анализу характеристик температурного поля поверхности заготовок/прутков при различных режимах прокатки и структурных характеристик полученных прутков.

По результатам дилатометрического анализа определён диапазон температур полиморфного превращения сплава ВТЗ-1 (963...1017 °C), что обеспечивает

основу для выбора температуры нагрева заготовки и прокатки в заданной фазовой области.

Результаты анализа данных, полученных в ходе экспериментального исследования, включая данные системы мониторинга и структурное состояние прутков, позволили установить зависимость температурного поля поверхности заготовки/прутка на входе/выходе ОД, а также эволюцию макро- и микроструктуры поперечного сечения прутков при различных значениях параметров процесса РСП.

При прокатке заготовок диаметром 95 мм с суммарным коэффициентом вытяжки $\mu_{\Sigma} = 2,4$ получаемая структура закономерно различается в зависимости от температуры прокатки, а также от формирующегося неравномерного теплового поля прутка в ОД. При увеличении количества проходов различия в макро- и микроструктуре между передним и задним концами прутка сокращаются.

В результате 2-го этапа эксперимента по прокатке заготовок диаметром 61 мм при $\mu_{\Sigma}=2,0$ установлено, что повышение температуры прокатки при прочих равных условиях снижает разницу между температурой на входе и выходе из валков, и уменьшает перепад температуры по длине прутка на выходе. Увеличение частоты вращения валков играет положительную роль, оказывая влияние на глубину проработки структуры, и способствует уменьшению балльности зерна в осевой зоне.

Высокий коэффициент вытяжки за проход ($\mu=2,0$) обеспечивает более равномерное температурное поле за счет увеличения интенсивности деформационного разогрева, при этом многопроходная прокатка обеспечивает лучшую проработку структуры по всему сечению прутка.

Анализ результатов 3-го этапа эксперимента с варьированием количества проходов (i_{Σ}), температуры нагрева заготовки (T_0), μ , и частоты вращения валков (n) в каждом проходе показал, что повышение температуры поверхности прутка на выходе из ОД определяется совокупным влиянием T_0 и μ при $n = \text{const}$. Увеличение μ при $T_0=930$ °С приводит к росту разницы между средней температурой входа и выхода $\Delta T_{\text{вых.-вх.}}$ за счет более интенсивного деформационного разогрева.

Повышение T_0 до 1000 °С снижает влияние деформационного разогрева на прирост температуры поверхности прутка на выходе из ОД относительно входа, что проявляется более выражено при меньших диаметрах заготовок ($D_0 \sim 23$ мм по сравнению со случаем $D_0 \sim 32$ мм).

Прокатка за 5 проходов при температуре 960 °С вместо 10 проходов при температуре 930 °С приводит к более проработанной структуре и уменьшению занимаемой области наибольшего балла зерна. Это подтверждает необходимость выбора температуры прокатки и количества проходов для достижения баланса между температурой заготовки в момент достижения ОД и выделяемого тепла в результате деформационного разогрева.

По результатам проведенных экспериментов построены диаграммы, показывающие эволюцию балла макроструктуры прутка для трех этапов эксперимента (рисунок 3), анализ которых показал следующее:

- РСП с малыми коэффициентами вытяжки за проход ($\mu=1,2\dots1,5$) при температурах, соответствующих двухфазной $\alpha+\beta$ -области ($\sim 960\dots980$ °С), не позволяет получить макроструктуру 1-го балла в осевой зоне прутка. Аналогичный эффект наблюдается при $\mu=1,5\dots2,0$ за проход и T_0 , близкой к верхнему пределу $T_{пп}$ (1000 °С);

- повышение количества проходов до $i_{\Sigma} = 10$ и более может приводить к росту балла зерна в осевой области прутка за счет преобладания процессов рекристаллизации и роста зерен при промежуточных подогревах;

- РСП при низкой температуре (~ 930 °С) и высокой скорости (~ 90 об/мин) показала положительные результаты для уменьшения балла зерна макроструктуры.

Также рассмотрены общие тенденции эволюции типа микроструктуры сплава ВТЗ-1 для опробованных температурно-деформационных режимов (рисунки 4 и 5).

Для осевой зоны прутка при различных температурах наиболее существенные отличия в микроструктуре нагрева проявляются после достижения $\mu_{\Sigma}=4,8$ (рисунок 4). Для первого этапа РСП в температурном диапазоне 900...1000 °С приводит к частичной деформации исходной пластинчатой микроструктуры с сохранением ориентации α -пластин. Дальнейшая деформация в $\alpha+\beta$ -области

обеспечивает дробление и сфероидизацию α -фазы, уменьшение размеров β -зерен и формирование микроструктуры переходного типа.

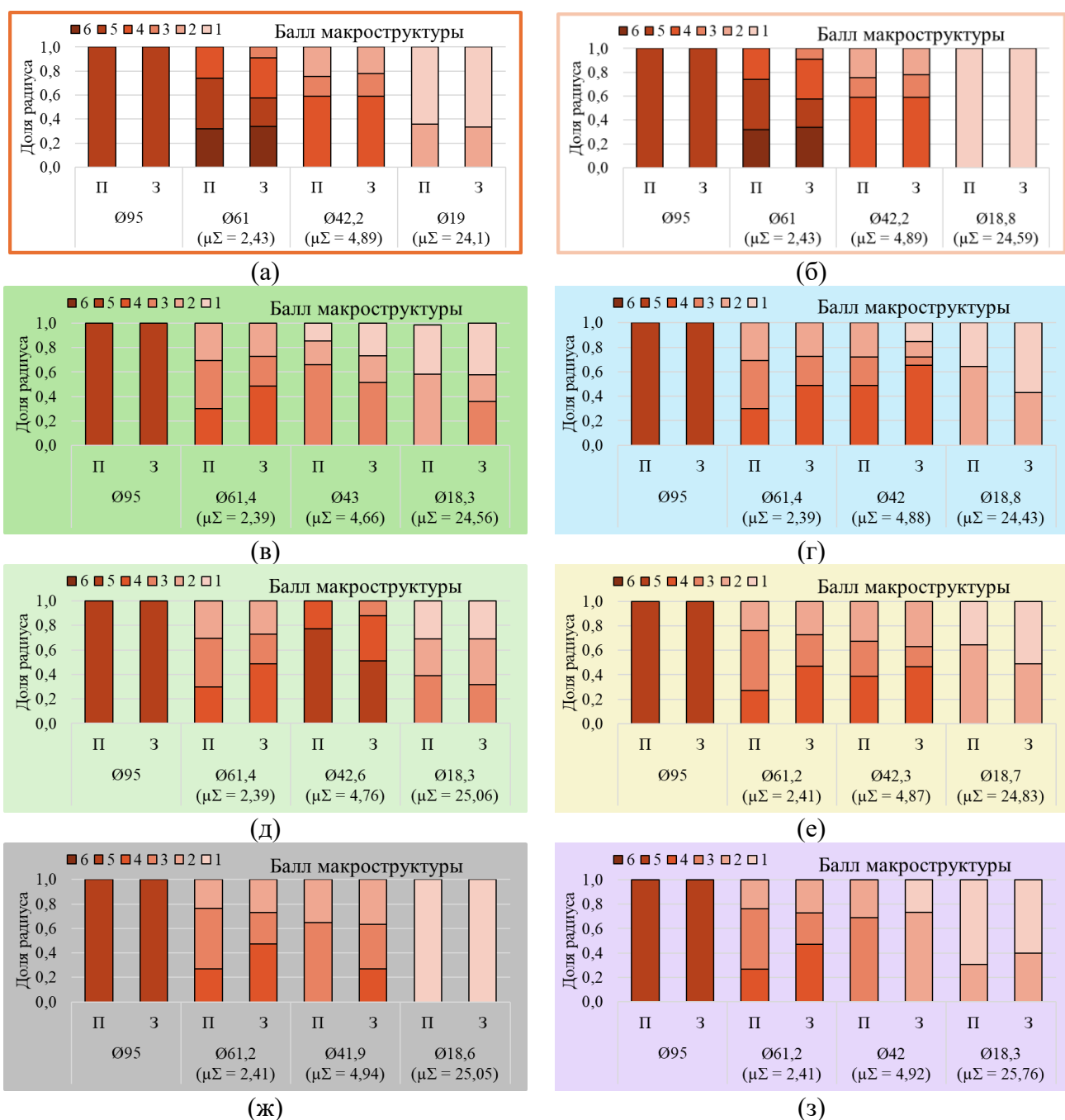


Рисунок 3 – Распределение балльности макроструктуры вдоль радиуса прутка, полученное по режимам прокатки 1-2-1 (а); 1-2-2 (б); 2-2-1 (в); 2-1-1 (г); 2-3-1 (д); 3-1-1 (е); 3-2-1 (ж); 3-3*-1 (з)

Для конечных прутков микроструктура осевой области, подверженной РСП в диапазоне температур 900...960 °С, относится к переходному типу и состоит из смеси сильно фрагментированной равномерно распределенной α и β фаз. При

температурах, близких к границе β -трансуса, получена глобулярная (бимодальная) микроструктура со сферическими зёрнами α -фазы и равноосными рекристаллизованными β -зёрнами.

Для области периферии прутка (рисунок 5) наблюдаются аналогичные закономерности преобразования микроструктуры в процессе деформации, с большей интенсивностью проработки. Уже после первого этапа деформации на периферии прутков происходит значительное искажение исходной пластинчатой формы α -фазы и формирование переходного типа микроструктуры (за исключением прокатки в β -области, где формируется характерная пластинчатая микроструктура). Наибольшие различия между поверхностью и центром наблюдаются после 2 этапа эксперимента ($\mu\Sigma=4,8$). В центре остается вытянутая форма α -фазы и фрагменты искаженных α -оторочек, в то время как на поверхности форма α -фазы уже близка к сферической, а размер β -зерен значительно меньше.

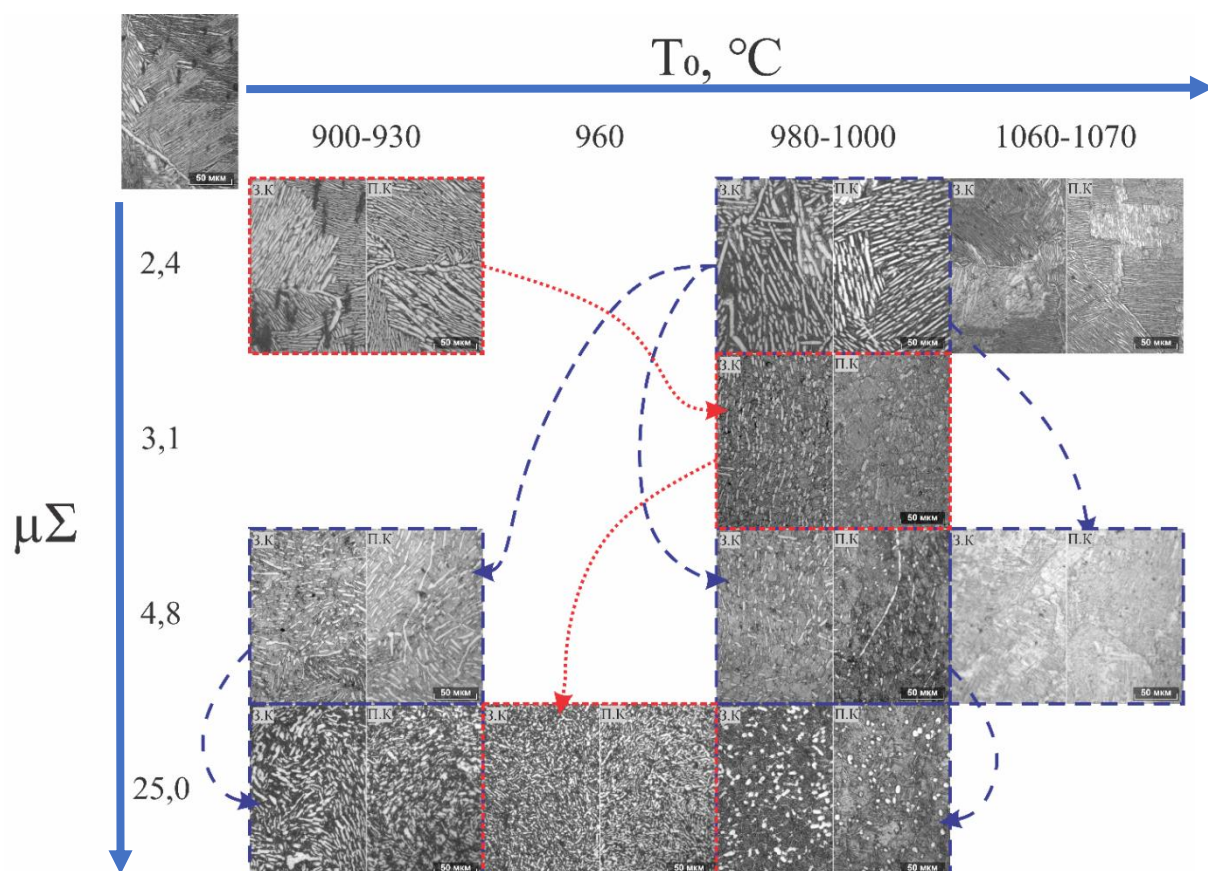


Рисунок 4 – Эволюция микроструктуры сплава ВТЗ-1 в центре поперечного сечения прутков, полученных при различных термо-деформационных режимах

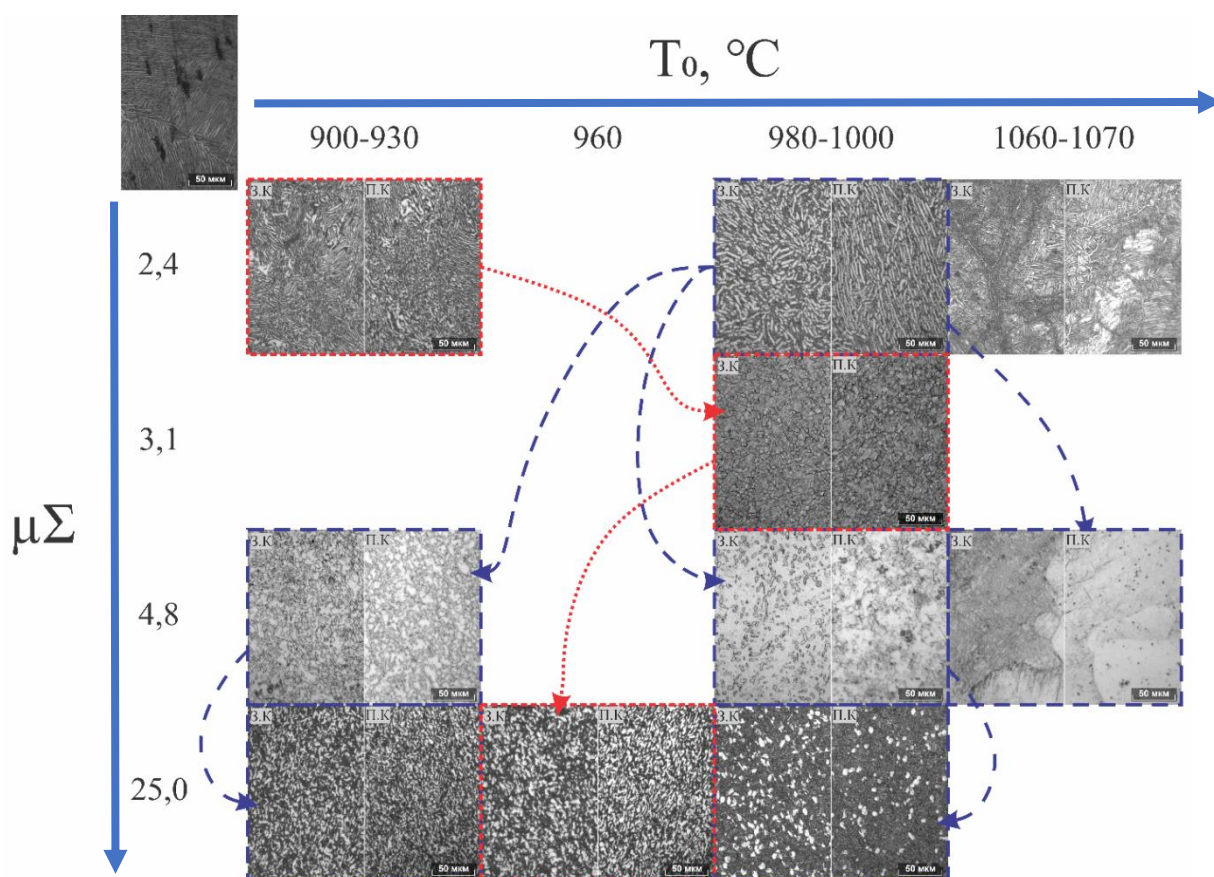
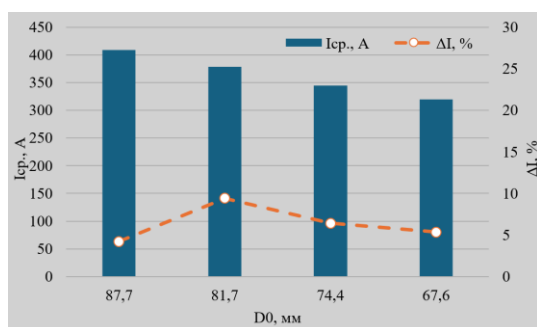


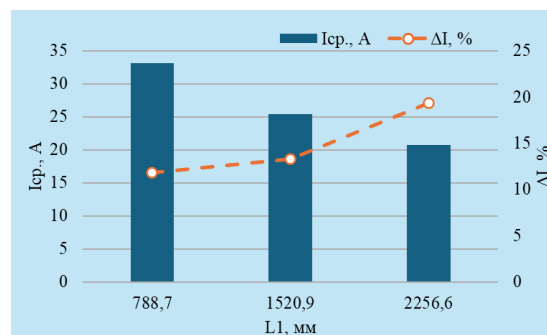
Рисунок 5 – Эволюция микроструктуры сплава ВТ3-1 на периферии поперечного сечения прутков, полученных при различных термо-деформационных режимах

На основании экспериментальных данных получены зависимости токовых нагрузок при РСП сплава ВТ3-1 по различным режимам, которые подтвердили значительное влияние неравномерности температурного поля по длине прутка на рост нагрузок на главный привод (рисунок 6).

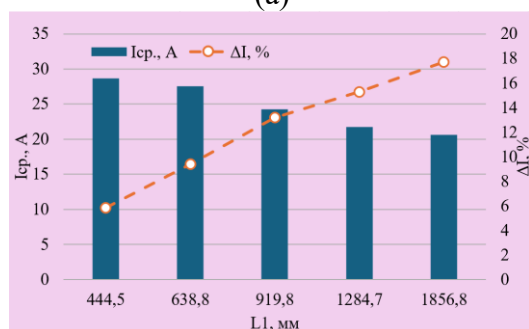
Полученные данные показывают существенное влияние разницы температуры переднего и заднего концов прутка на изменение токовой нагрузки, в особенности для прутков малого диаметра (менее 40 мм) и длиной свыше 1000 мм. Наиболее показательным является режим прокатки, представленный на рисунке 6, г, при температуре 930 °С, частоте вращения валков $n=30$ об/мин и диаметрах прутков 30...20 мм длиной ~1800...2500 мм. При таком режиме происходит наиболее интенсивное охлаждение заднего конца заготовки, что выражается в росте разницы тока начала и конца прокатки до $\Delta I = 32...37$ %. При этом снижение средней токовой нагрузки составляет всего 6 А.



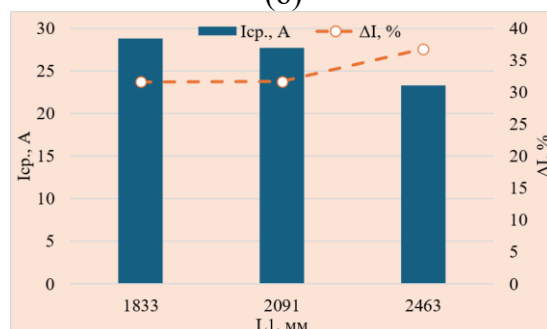
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 6 – Средняя токовая нагрузка I_{cp} и изменение тока ΔI при различных режимах прокатки: Стан 130Т, $T_0 = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 20\text{ мин}^{-1}$, $\mu = 1,15...1,22$ (а); Стан 14-40, $T_0 = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 60\text{ мин}^{-1}$, $\mu = 1,75/1,93/1,48$ (б); Стан 14-40, $T_0 = 960\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 60\text{ мин}^{-1}$, $\mu = 1,26...1,45$ (в); Стан 14-40, $T_0 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 30\text{ мин}^{-1}$, $\mu = 1,36/1,55/1,32$ (г)

Определен вклад температуры прокатки и частоты вращения валков в кинематические параметры прокатки (таблица 2).

Таблица 2 – Расчетные и экспериментальные данные скоростных и деформационных параметров при различных температуре и частоте вращения валков

$T_0, ^{\circ}\text{C}$	n , об/мин	β , град	D_0 , мм	L_0 , мм	D_1 , мм	μ	τ_{ϕ} , с	τ_t , с	$L_{o.d.}$, мм	S_1 , мм	η_0	η_t
930	65	20	60	315	42,96	2,0	3,30	2,96	90	20,0	0,90	0,73
1000	65	20	60	315	42,01	2,0	3,38	3,10	90	20,2	0,91	0,73
1070	65	20	60	315	42,56	2,0	3,14	2,95	90	20,6	0,94	0,74
1000	22	20	60	305	42,25	2,0	8,21	8,49	90	22,0	1,04	0,76
1000	65	20	60	315	42,01	2,0	3,38	3,10	90	20,2	0,91	0,73
1000	96	20	60	305	41,9	2,1	2,59	2,06	90	19,6	0,80	0,65

Результаты расчетов и проведенного эксперимента показывают, что между условиями скольжения в очаге деформации и температурно-скоростными параметрами существует заметная корреляционная зависимость: прямая для температуры прокатки и обратная для скорости. Изменение скорости в исследуемом диапазоне n от 22 до 96 об/мин оказывает более существенное

влияние на изменение коэффициентов осевой и тангенциальной скоростей, чем варьирование температуры нагрева заготовки. Так, повышение температуры прокатки с 930 до 1070 °С приводит возрастанию η_o с 0,9 до 0,94. При этом коэффициент тангенциальной скорости практически не изменяется и находится в пределах 0,73...0,74. При минимальной частоте вращения валков ($n=22$ об/мин) $\eta_o > 1$, что говорит о возникновении осевого опережения в зоне выхода из очага деформации. С повышением скорости прокатки проскальзывание заготовки относительно вала начинает увеличиваться и коэффициент осевой скорости линейно снижается до 0,8. Скольжение в радиальном направлении также увеличивается с ростом скорости прокатки, что подтверждается снижением η_r с 0,76 до 0,65.

Установлено, что радиально-сдвиговая прокатка прутков из сплава ВТЗ-1 при невысоких скоростях и температуре >1000 °С протекает без скольжения или с незначительным опережением в осевом направлении. В остальных случаях наблюдается осевое скольжение, достигающее максимума ~ 20 %, при частоте вращения валков 96 об/мин. В радиальном направлении процесс протекает со скольжением $\sim 25...35$ %, которое увеличивается с повышением скорости прокатки.

В четвёртой главе описан процесс разработки конечно-элементной цифровой модели процесса РСП прутков из сплава ВТЗ-1 в программном комплексе QForm. ЦМ учитывает температурную зависимость теплофизических свойств материала заготовки/инструмента, реологическое поведение материала заготовки, а также условия контактного теплообмена и трения.

В качестве критериев верификации были выбраны температура поверхности прутка на входе и выходе из очага деформации, машинное время прокатки, а также геометрия полученного прутка и форма и размеры концевой утяжки. Выбор факторов обусловлен их значимостью, а также возможностью проведения измерений в процессе прокатки или по результатам эксперимента. Для разработки цифровой модели РСП установлена максимальная относительная погрешность до 10 %.

По времени прокатки максимальное абсолютное отклонение между результатами моделирования и эксперимента составляет 0,76 с для режима №2 первого этапа прокатки в последнем проходе, что соответствует относительному отклонению 4,73 %.

Максимальное относительное отклонение длины прутка составляет 6,3 % для режима № 3, что может быть обусловлено накоплением ошибок при расчетах многопроходной прокатки. Для глубины утяжки разница между расчетными и экспериментальными данными составляет не более 2,4 мм (или 9,8 %). Абсолютная разница по диаметру прутков не превышает 0,83 мм (1,95 %) для режима № 2-2, что свидетельствует о высокой точности цифровой модели при анализе геометрических размеров прутков, полученных в условиях исследуемых режимов прокатки.

Результаты измерений температуры поверхности прутка на выходе из ОД демонстрируют высокую степень сходимости (таблица 3). Для всех исследуемых режимов прокатки относительная ошибка по средней температуре поверхности прутка на выходе из ОД не превышает 1,6 %, что свидетельствует о высокой степени соответствия моделируемых и экспериментальных данных и подтверждает достоверность применяемой модели для анализа температурного режима прокатки.

На основе построенной и верифицированной ЦМ проведено многофакторное компьютерное моделирование с целью определения влияния режимов РСП на температурно-деформационные параметры процесса. Установлены закономерности влияния длины заготовки, частоты вращения валков и исходной температуры нагрева на температурное поле прутка (рисунок 7).

Увеличение длины заготовки приводит к росту разности температур поверхности переднего и заднего концов прутка, при этом данная разность увеличивается при повышении температуры нагрева заготовки. Кроме того, увеличение длины заготовки влияет на неравномерность температуры поперечного сечения заднего конца прутка.

При минимальной частоте вращения валков 30 об/мин увеличение длины заготовки от 500 до 1000 мм приводит к росту разницы температур между

поверхностью и центром для заднего конца прутка $(T_{\text{ц}} - T_{\text{р}})_{\text{з.к.}}$ на ~ 5 °С. Однако для $L_0=1500$ мм эта разница, напротив, уменьшается.

Таблица 3 – Сравнение температуры поверхности прутка на выходе из ОД при моделировании и эксперименте

№ этапа	№ режима	№ прохода	$T_{\text{эксп.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{симул.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{абс.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{отн.}}, \%$
Этап №1	1	1	973,2	977,1	3,9	0,4
	2	1	906,3	910,4	4,1	0,5
		2	873,6	880,6	7,0	0,8
		3	891,2	891,5	0,3	0,0
	3	1	863,3	864,1	0,8	0,1
		2	837,5	837,7	0,2	0,0
		3	839,7	839,9	0,2	0,0
		4	850,1	846,4	3,7	0,4
		5	852,4	850,0	2,4	0,3
Этап №2	2-2	1	961,3	947,3	14,0	1,5
	2-1	1	999,1	1000,0	0,9	0,1
	2-3	1	1012,6	1029,3	16,7	1,6
	3-1	1	945,4	951,7	6,3	0,7
	3-2	1	1023,6	1034,5	10,9	1,1
	3-3	1	945,3	944,9	0,4	0,0
	3-3*	2	-	-	-	-
		3	918,2	925,0	6,8	0,7
		4	897,3	904,8	7,5	0,8
	1-2	1	1004,6	1003,7	0,9	0,1
	1-1	1	993,0	991,5	1,5	0,2

При максимальной частоте вращения валков $n=120$ об/мин и диапазона температур нагрева заготовки $T_0=940\dots 1000$ °С получены отрицательные значения $(T_{\text{ц}} - T_{\text{р}})_{\text{з.к.}}$, которые при росте длины от 500 до 1500 мм уменьшаются примерно до 0, т.е. температура по сечению выравнивается. При $T_0 = 1060$ °С наименьшая разница температур между поверхностью и центром получена для минимальной длины заготовки 500 мм. Увеличение длины приводит сначала к росту рассматриваемого показателя примерно до 11 °С, а затем к его снижению до ~ 5 °С.

Указанные закономерности обусловлены совокупностью условий, а именно скоростью охлаждения поверхности заготовки, интенсивностью внутреннего теплообмена заготовки и разогревом поверхности вала к моменту, когда задний конец прутка достигает ОД.

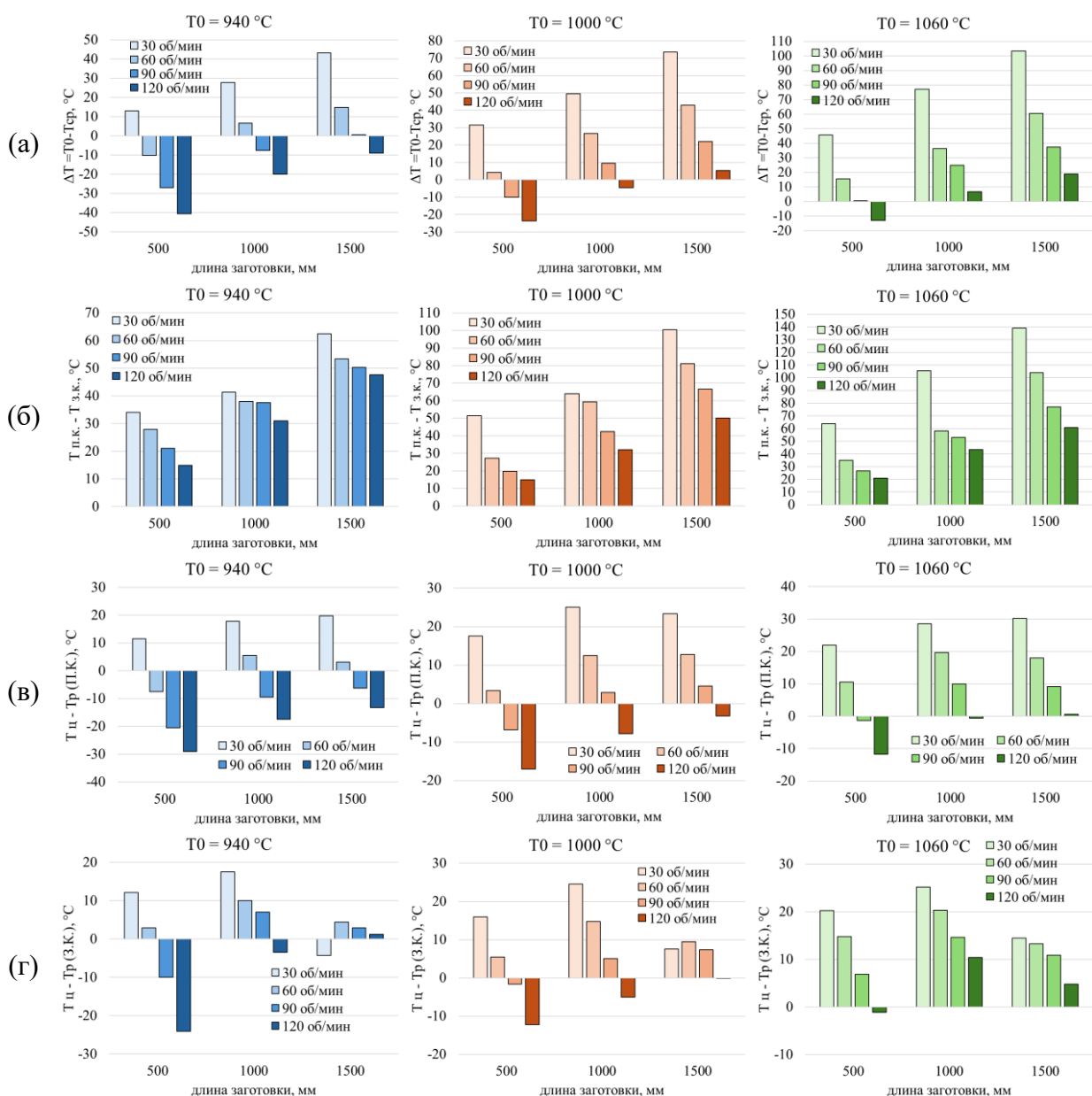


Рисунок 7 – Изменение средней температуры прутка относительно температуры прокатки (а), разница температур переднего и заднего концов прутка (б) и разница температур центра и поверхности для переднего и заднего концов прутка (в, г)

Изменение частоты вращения валков оказывает значительное влияние на все исследуемые характеристики температурного поля прутка, при этом наблюдается их отрицательная корреляция. Увеличение n приводит к отрицательным значениям ΔT (рисунок 7, а), т.е. средняя температура поверхности прутка на выходе из ОД становится выше исходной температуры нагрева. Это обусловлено сокращением времени контакта прутка с инструментом в ОД (меньший теплообмен между заготовкой и валком) и сокращением машинного времени прокатки. Всё это в сочетании с дополнительным разогревом за счет трения на контакте при

скольжении может приводить к $T_{\text{ср.вых.}}$, превышающей температуру прокатки на 41 °С (при $T_0=940$ °С, $L_0=500$ мм и $n=120$ об/мин). Повышение скорости прокатки приводит к снижению неравномерности температуры между П.К. и З.К. в несколько раз для всех исследуемых температур. Стоит отметить, что в рамках исследуемых параметров прокатки аппроксимированная линия изменения значения $T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}$ на обоих концах проходит через ноль оси ординат, что позволяет подбирать режимы РСП с целью получения наиболее равномерного температурного поля прутка по поперечному сечению.

Теплофизические свойства сплава ВТЗ-1 при заданной температуре прокатки определяют интенсивность изменения его температуры при варьировании других параметров РСП. Так, для заготовки длиной 1500 мм при $T_0 = 940$ °С и частоте вращения валков 60 об/мин ΔT составляет ~15 °С, а при $T_0 = 1060$ °С ΔT увеличивается до ~62 °С (рисунок 7, а). Равномерность температуры прутка вдоль его оси ($T_{\text{п.к.}} - T_{\text{з.к.}}$) не столь существенно зависит от температуры T_0 , изменяясь для самой большой длины заготовки 1500 мм приблизительно на 30 °С при повышении температуры нагрева на 60 °С. С повышением T_0 для всех рассматриваемых L_0 и n наблюдается тенденция к изменению величины ΔT в сторону положительных значений.

Скорость охлаждения заготовки из титанового сплава ВТЗ-1 зависит от температуры нагрева (фазового состояния и соответствующих теплофизических свойств), что сказывается на температуре заднего конца прутка при достижении зоны деформации даже при малых временных интервалах. Например, в режимах с $L_0=500$ мм и $n=120$ об/мин при температуре прокатки $T_0=940$ °С на заднем конце прутка температура поверхности превышает температуру осевой зоны на 24 °С (рисунок 7, г). Это обусловлено (помимо деформационного разогрева в ОД) меньшей скоростью охлаждения поверхности при данной температуре. При $T_0=1060$ °С скорость охлаждения поверхности возрастает, выравнивая разницу температур $T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}$ до 1 °С.

Проведённый многофакторный анализ позволил количественно описать зависимость неравномерности температурного поля прутка от технологических

параметров. Полученные данные могут служить основой для выбора рациональных режимов РСП, обеспечивающих минимальную неравномерность температурного поля прутка.

Пятая глава посвящена разработке рекомендаций по совершенствованию термо-деформационных режимов РСП сплава ВТЗ-1. Проведённый сопоставительный анализ показал корреляционную связь между структурой и температурно-деформационными параметрами РСП. Используя данные верифицированной ЦМ и методы машинного обучения (RandomForest, ExtraTrees, GradientBoosting, XGBoost, LightGBM, SVR) разработана модель для прогнозирования конечной температуры T_k и накопленной степени деформации ϵ_k для прутков после РСП. В качестве исходных данных задавались следующие параметры: D_0 , L_0 , D_1 , L_1 , μ , μ_Σ , n , T_0 , L_{pos} (позиция по длине), R_{pos} (позиция по поперечному сечению).

После использования обученных моделей на тестовом и тренировочном наборах данных эти модели были апробированы на данных из валидационной выборки (рисунок 8). Наилучшие результаты по совокупности метрик оценки точности (RMSE, MAE, MAPE, R^2) показала модель GradientBoosting (ошибки не превышают 10 %). Это подтверждает возможность прогнозирования термо-деформационных параметров без проведения трудоёмких экспериментов и моделирований.

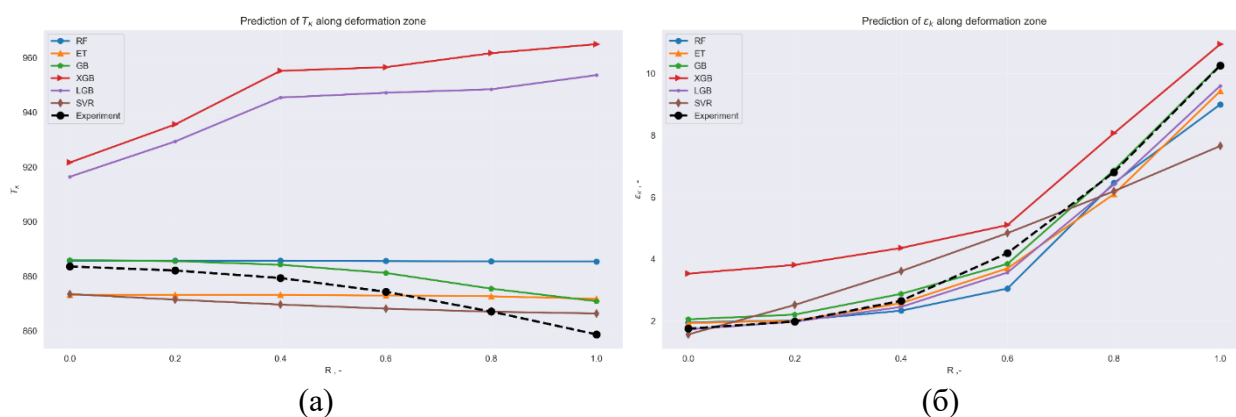


Рисунок 8 – Результаты сравнения прогнозирования T_k и ϵ_k для валидационной выборки

Также установлены зависимости, в виде полиномов 2 степени с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,96$, разницы температур между передним и

задним концом и «центр – поверхность» от частоты вращения валков, температуры нагрева и длины заготовки. Для всех вариантов температур, но в большей степени для более низких, соответствующих нижней границе $T_{пп}$ или α -области, при высокой скорости прокатки ($n=90\ldots 120$ об/мин) наблюдается отрицательная разница $T_{ц} - T_{р}$, что говорит о более высокой температуре поверхности. Это также подтверждает сделанные выводы о более интенсивном деформационном разогреве за счет высокой скорости деформации на поверхности прутка, а также разогреве поверхности за счет повышенного скольжения при низких температурах и высокой скорости. Полученные зависимости позволяют рассчитать температурно-скоростной режим РСП, при котором может быть обеспечен минимальный градиент температур по длине и поперечному сечению, либо сохранение средней температуры прутка, равной температуре нагрева заготовки.

Для подтверждения полученных зависимостей выполнено моделирование при расчётных скоростях, соответствующих минимальной разнице между температурой поверхности прутка и температурой нагрева заготовки. В результате подбора частоты вращения валков удалось не только снизить эту разность, но и обеспечить более равномерное распределение температуры по поперечному сечению прутка на обоих его концах (рисунок 9). Это свидетельствует о возможности управления скоростью вращения валков для достижения равномерности температурного поля прутка в ходе процесса РСП.

Учитывая особую актуальность данной задачи при прокатке прутков малого диаметра (<40 мм) из двухфазных титановых сплавов, предложены и рассмотрены несколько вариантов методик регулирования частоты вращения валков в процессе прокатки:

- РСП с постоянной частотой вращения валков 60 об/мин $n=\text{const}$ (static_60);
- изменение частоты вращения валков с 60 до 120 об/мин согласно линейному закону $n=kx+b$, где $k=1,2; 1,5$ (line_1,2; line_1,5);
- изменение частоты вращения валков с 60 до 120 об/мин в зависимости от текущей температуры прутка на выходе из валков $T_{\text{вых}}$ с шагом изменения 5 и 10 об/мин (60-120/10; 60-120/5).

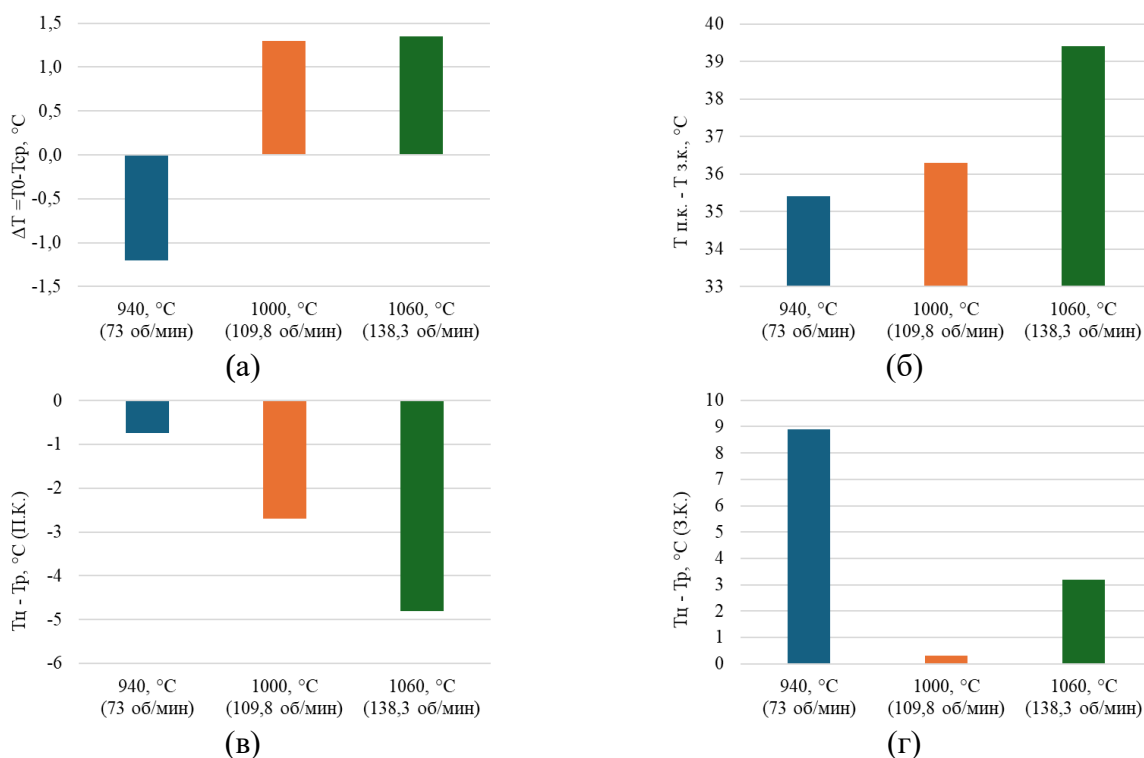


Рисунок 9 – Характеристики температурного поля прутка: ΔT (а); $T_{п.к.} - T_{з.к.}$ (б); $T_{ц} - T_{р}$ для П.К. (в); $T_{ц} - T_{р}$ для З.К. (г) при частоте вращения валков, соответствующей минимальной ΔT для каждой температуры прокатки

Для реализации последнего варианта в QForm с помощью API была разработана пользовательская подпрограмма «Виртуальный пирометр», которая фиксирует температуру поверхности прутка на выходе из валков в заданной точке на каждом заданном шаге расчета (рисунок 10, а и в), сравнивает с температурой нижнего (или верхнего) предела температуры $T_{min/max}$ и в зависимости от результата реализует вариант повышения, снижения или сохранения значения частоты вращения валков.

Оценку эффективности регулирования скоростного режима также возможно количественно оценить по средней температуре прутка на выходе (рисунок 10, б и г). Для температур нагрева заготовки 960, 990 и 1050 °C показано, что повышение n с 60 до 120 об/мин (линейно или пошагово по температуре на выходе) позволяет поднять среднюю температуру прутка на выходе на 22...38 °C и сократить машинное время прокатки на 31...44 % по сравнению с режимом $n=const$. Наиболее эффективно пошаговое регулирование, поддерживающее температуру заднего конца на уровне не ниже заданного предела, что дает

возможность управления температурными условиями РСП прутков малого диаметра при длине более 1000 мм.

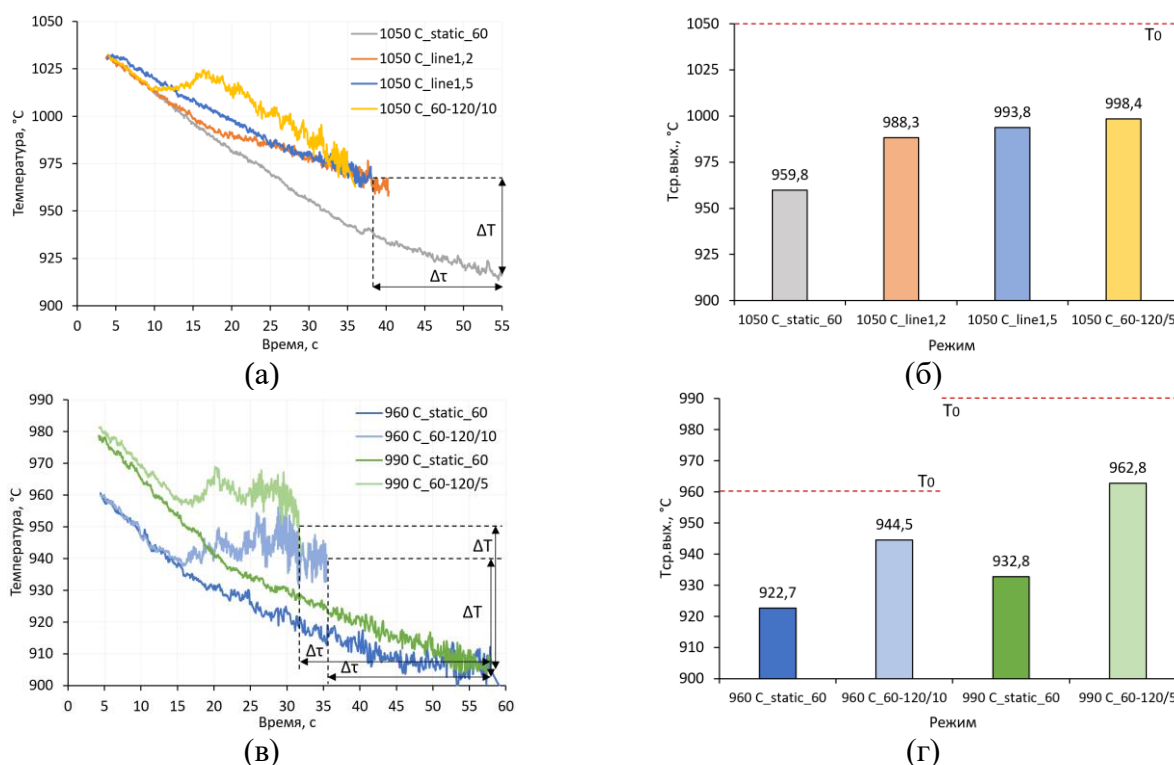


Рисунок 10 – Сравнение $T_{вых}$ (а, в) и средней температуры на выходе $T_{ср.вых}$ (б, г) для различных режимов работы привода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана и апробирована система мониторинга процесса прокатки, позволяющая в реальном времени фиксировать температуру поверхности заготовки/прутка на входе и выходе из очага деформации, машинное время прокатки, частоту вращения валков и токовую нагрузку, а также выполнять управление приводом через обратную связь в зависимости от температуры. На опытно-промышленных станах РСП проведено экспериментальное исследование, реализующее 59 режимов РСП ($T_0 = 930...1070\text{ }^\circ\text{C}$, $D_0 = 40...95\text{ мм}$, $L_0 = 150...1800\text{ мм}$, $\mu = 1,1...2,4$, $n = 20...90\text{ об/мин}$). Получен и систематизирован массив экспериментальных данных о температуре поверхности заготовки/прутка на входе/выходе из ОД, токовой нагрузке на привод, скоростных параметрах (машинное время прокатки и условия скольжения в очаге деформации) и

характеристиках структуры: балл макрозерна по сечению и длине проката, тип микроструктуры для прутков диаметром 18...60 мм из сплава ВТЗ-1.

2. Установлены закономерности влияния параметров РСП на распределение температуры и структурообразование, получены зависимости токовых нагрузок при РСП сплава ВТЗ-1 по различным режимам, и определен вклад температуры прокатки и частоты вращения валков в кинематические параметры прокатки. Показано, что повышение температуры прокатки и коэффициента вытяжки обеспечивает более равномерное температурное поле прутка, а увеличение частоты вращения валков интенсифицирует проработку осевой зоны. Совокупность влияния температуры нагрева и обжата определяет характер изменения температуры прутка. Многопроходная прокатка уменьшает различия в микромакроструктуре между передним и задним концами прутка.

3. В программном комплексе QForm разработана и верифицирована конечно-элементная модель процесса РСП прутков из сплава ВТЗ-1, адекватно описывающая температурное поле, формоизменение и геометрические размеры прутка, временные параметры и условия трения, с относительной ошибкой не более 10 %.

4. Впервые создана предиктивная ML-модель термо-деформационных параметров процесса РСП прутков диаметром 18...60 мм из сплава ВТЗ-1, позволяющая при заданных начальных параметрах получать распределение температуры и накопленной степени деформации по сечению переднего и заднего концов прутка с ошибкой, не превышающей 10 %. ML-модель может быть интегрирована в АСУ ТП стана для автоматизированного расчета и корректировки режимов прокатки в реальном времени с целью обеспечения требуемых структурных характеристик готового проката.

5. Установлены зависимости ($R^2 > 0,96$) температурного поля прутка от частоты вращения валков, температуры нагрева заготовки и длины заготовки. Рассчитанный с помощью полученных данных скоростной режим РСП заготовки диаметром 30 мм и длиной 1000 мм обеспечивает равномерность температуры по поперечному сечению с отклонением $< 9\text{ }^{\circ}\text{C}$, а разница температур П.К. и З.К. не

превышает 40 °С. Предложена методика регулирования частоты вращения валков в процессе прокатки в зависимости от температуры прутка на выходе из валков, которая позволяет поддерживать более равномерную температуру по длине, и сокращает машинное время прокатки на 31...44 %.

6. В опытно-промышленных условиях уточнены и опробованы рациональные термо-деформационные режимы, обеспечивающие получение равномерной мелкозернистой макроструктуры и требуемого типа микроструктуры. РСП за 5 проходов с $\mu_{\Sigma}=5,0$, начинающаяся в температурном диапазоне $\alpha+\beta$ -области и окончательными проходами при $T_0 = T_{пп} - 30$ °С, способствует получению прутков длиной не менее 1700 мм с равномерной макроструктурой (1 балл) и бимодальной глобулярно-пластинчатой микроструктурой по всему объёму прутка.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. **А. Махмуд Алхаж Али**, Ю.В. Гамин, А.Н. Хакимова, Т.Ю. Кин, С.П. Галкин. Влияние температурных условий радиально-сдвиговой прокатки на структуру сплава BT3-1 // *Металлург*, (2025) 65–73.

2. **Mahmoud Alhaj Ali**, A.N. Khakimova, Yu.V. Gamin, T.Yu. Kin, N. Letyagin, D. Demin. Numerical Analysis and Experimental Verification of Radial Shear Rolling of Titanium Alloy // *Modelling*, 6 (2025) 93.

3. **Mahmoud Alhaj Ali**, A.N. Khakimova, D.A. Zlobin, A.A. Kondrat'eva Analysis of the Cooling of Two-Phase Titanium Alloys: Finite Element Modeling and Experiment // *Steel in Translation*, 55 (2025) 985–991.

4. **Махмуд Алхаж Али А.**, Хакимова А. Н., Гамин Ю. В. Влияние Температурных Условий РСП на Макроструктуру Сплава BT3-1. Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов, 22-26 октября 2024 года, Москва, Россия. С. 112.

5. **Махмуд Алхаж Али. А.** Многофакторный анализ условий радиально-сдвиговой прокатки титанового сплава BT3-1 на основе эксперимента и моделирования МКЭ. Научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК им. С.З. Афонина, (3–5 декабря) 2025, Выкса.