

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

На правах рукописи

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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук, доцент
Гамин Юрий Владимирович

Москва – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	12
1.1. Влияние параметров РСП на характеристики проката	12
1.1.1 Геометрические характеристики прутка	13
1.1.2 Температурное поле прутка	13
1.1.3 Скоростные параметры РСП	17
1.2. Системы контроля температуры проката	18
1.3. Выбор объекта исследования	21
1.3.1 Применение	21
1.3.2. Формирование структуры и свойств	21
1.4. РСП двухфазных титановых сплавов	23
1.5. Применение цифровых моделей и методов машинного обучения в прокатном производстве	24
Выводы по главе 1	28
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ	29
2.1. Материалы и методы исследования	29
2.1.1. Станы РСП	29
2.1.2. Система мониторинга характеристик процесса прокатки	32
2.2. Экспериментальная тарировка системы контроля температуры	35
2.3. Постановка задач и разработка плана эксперимента	39
2.3.1 Задачи исследования	39
2.3.2 Разработка плана эксперимента	40
Выводы по главе 2	48
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РСП ТИТАНОВОГО СПЛАВА	49
3.1 Определение диапазона температуры полиморфного превращения	49
3.2 Экспериментальная прокатка	49
3.2.1 Первый этап: прокатка на стане МИСиС-130Т	50
3.2.2 Второй этап: прокатка на стане МИСиС-100Т	58
3.2.3 Третий этап: прокатка на министане 14-40	70
3.2.4 Анализ эволюции макроструктуры и микроструктуры	81
3.2.5 Анализ нагрузок и скоростных параметров	86
Выводы по главе 3	91

ГЛАВА 4. КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	93
4.1. Создание модели.....	93
4.2. Верификация модели.....	97
4.2.1 Время прокатки	97
4.2.2 Геометрические размеры и формоизменение прутка	98
4.2.3. Температура поверхности заготовки/прутка	101
4.3. Многофакторный компьютерный эксперимент и определение влияния режимов РСП на температурно-деформационные параметры.....	102
4.3.1. Влияние длины заготовки и прутка.....	102
4.3.2. Влияние скорости прокатки	104
4.3.3. Влияние температуры нагрева	105
Выводы по главе 4	106
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕРМО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РСП СПЛАВА ВТЗ-1	107
5.1. Цифровая модель расчета температурно-деформационных параметров РСП на основе МКЭ и машинного обучения.....	109
5.1.1. Подготовка данных и обучение ML моделей	109
5.1.2. Оценка результатов обученных моделей	110
5.1.3. Экспериментальное сравнение результатов	112
5.2. Регулирование температурных условий РСП за счет скоростного режима	114
5.3. Предложения по совершенствованию термо-деформационных режимов радиально-сдвиговой прокатки прутков из сплава ВТЗ-1	121
5.3.1 Выбор температурного режима деформации	121
5.3.2 Выбор деформационного и скоростного режима	122
Выводы по главе 5	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	124
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	126
ПРИЛОЖЕНИЕ А	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	144
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	148

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей работе использованы следующие сокращения и обозначения:

З.К. - задний конец

ИК - инфракрасный

МКЭ - метод конечных элементов

НД - нормативная документация

НДС - напряженно-деформированное состояние

ОД - очаг деформации

ОМД - обработка металлов давлением

П.К. - передний конец

ПК - персональный компьютер

РСП - радиально-сдвиговая прокатка

ТПП - температура полиморфного превращения

УВМ - управляющая вычислительная машина

ЦД - цифровой двойник

ЦМ - цифровая модель

ET - ExtraTrees (Extremely Randomized Trees)

GB - GradientBoosting (Градиентный Бустинг)

LGBM - Light Gradient Boosting Machine

LHS - метод латинского гиперкуба

MAE - средняя абсолютная ошибка

MAPE - средняя абсолютная процентная ошибка

ML - машинное обучение

MSE - среднеквадратичная ошибка

R^2 - коэффициент детерминации

RF - RandomForest (Случайный Лес)

RMSE - квадратный корень из среднеквадратичной ошибки

SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

XGB - XGBoost (Экстремальный Градиентный Бустинг)

ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники предъявляет к конструкционным металлическим материалам все более строгие требования по комплексу механических и эксплуатационных свойств (прочности, пластичности, жаропрочности, коррозионной стойкости, теплопроводности и т.д.), 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. В этом контексте значимость титана и сплавов на его основе в современном мире трудно переоценить. Уникальные свойства титана и существующих титановых сплавов, такие как высокая прочность, отличная коррозионная стойкость, жаропрочность, невысокая удельная плотность и др. определили применимость и востребованность этого конструкционного материала во многих отраслях. Все это является мощным стимулом для дальнейшего расширения применения титана и его сплавов, как в традиционных областях – авиастроении и авиакосмической технике, так и в других областях деятельности – автомобилестроении, наземном, водном и трубопроводном транспорте, строительстве, нефтегазодобывающей и медицинской технике, бытовых приборах и оборудовании, электротехнике, сельском хозяйстве и др. Так, например, в ракетах-носителях и космических аппаратах доля деталей из титановых сплавов составляет от 5 до 30 % [1]. Основными потребителями титановой продукции на российском самолётостроительном рынке являются ОАК и ОДК, осуществляющие производство самолётов и двигателей гражданского, транспортного, специального и военного назначения. Среди наиболее титаноёмких программ гражданского назначения можно отметить самолёты SSJ-100, MS-21. С каждым годом расширяется применение титана в медицине (хирургические имплантаты, медицинский инструмент, вспомогательные средства и аппаратура), чему способствуют высокая коррозионная стойкость, биосовместимость и механическая совместимость титана [1]. Учитывая задачи государства в создании собственных производств и технологий, несомненным является перспективность и стратегическая значимость научных исследований в области расширения и развития технологий получения продукции из титановых сплавов.

Вместе с тем стоимость готовой продукции из титановых сплавов в десятки раз превышает стоимость исходного сырья, что связано с трудностями извлечения титана из руд, его особых технологий выплавки и переработки в деформированные полуфабрикаты. Производство деформированных полуфабрикатов также 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. Это, в свою очередь, ограничивает дальнейшее более широкое применение титановых сплавов [1].

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. Управляя типом и параметрами структуры в процессе деформационной и термической обработки, можно изменять уровень свойств в весьма широких пределах и добиваться такого их сочетания, которого невозможно получить только методами легирования.

Одним из направлений современных исследований в области совершенствования технологий и оборудования является создание цифровых двойников (ЦД). Важной особенностью цифрового двойника является то, что для задания на него входных воздействий используется информация с датчиков реального устройства. Благодаря имитационному моделированию реальной физической среды на основе информации от реального оборудования цифровые двойники позволяют создать модели, достаточно близко повторяющие реальный процесс и работу оборудования. Это позволяет получить полезные данные о системе или технологическом процессе, снизить производственные издержки и затраты на проведение опытных и экспериментальных работ, а также разрабатывать новые или управлять технологическим процессом.

Известно, что прокатка 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 прокатки 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 термо-деформационных режимов для прутков малого диаметра непосредственно в условиях действующих производств.

Все вышесказанное отражает перспективность и актуальность темы исследования.

Цель и задачи работы

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 термодеформационные 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 dilatометрическим методом испытаний на закалочно-деформационном dilatометре DIL 805 A/D. Конечно-элементное моделирование выполняли в программном комплексе QForm 3D v11 с использованием теплофизических и реологических свойств сплава BT3-1, 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 BT3-1, 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.

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.

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

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.

Благодарности

Автор выражает признательность научному руководителю Гамину Ю.В., руководству и коллективу кафедры ОМД НИТУ МИСИС, в частности Кошмину А.Н., Кин Т.Ю. и Хакимовой А.Н., за поддержку и помощь в выполнении научных исследований. Отдельная благодарность директору НПЦ «ОМД» Карпову Б.В. за содействие в обеспечении заготовок для экспериментальных исследований. Автор благодарит к.т.н., доцента, заведующего кафедрой обработки металлов давлением Алещенко А.С. за предоставление необходимого оборудования для создания системы мониторинга,

Соколова П.Ю. – за помощь в проведении дилатометрического анализа, а также Дёмина Д.О. – за содействие в разработке ML моделей.

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.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Влияние параметров РСП на характеристики проката

На данный момент одним из основных методов получения прутков круглого сечения, наряду с продольной сортовой прокаткой и ковкой, является радиально-сдвиговая прокатка (РСП). Данный способ деформационной обработки представляет собой вариацию процесса винтовой прокатки сплошных заготовок, отличающуюся от классического способа высокими значениями угла подачи, составляющими 18° и более [2, 3]. Кроме того, к особенностям РСП можно отнести интенсивную проработку структуры металла и возможность прокатки с большими коэффициентами вытяжки (4,0...6,0 и более). Данный способ прокатки применяется для изготовления прутков из малопластичных и труднодеформируемых сплавов, многих цветных металлов, жаропрочных сплавов.

Оценка результатов процесса прокатки связана с определением качественных и количественных характеристик качества продукции. Достижение рациональных значений свойств требует изучения технологических параметров процесса, влияющих на характеристики продукции, что в свою очередь позволит управлять ими посредством варьирования режимов обработки [4, 5].

Как правило, прокат поставляется в соответствии с нормативной документацией НД (ГОСТ, ТУ, международные стандарты), где указаны основные требования к характеристикам продукции. Чаще всего такими требованиями являются параметры точности геометрических размеров и допустимые отклонения, требования к структуре и свойствам (физическим, механическим, эксплуатационным), качеству поверхности и др. Технологический процесс получения металлопроката должен быть реализован таким образом, чтобы обеспечить выполнение этих требований. С другой стороны, к технологии предъявляются требования по технологичности, эффективности, т.е. реализации со стабильным качеством, повторяемостью результатов, при минимизации энергозатрат, трудоемкости и расходного коэффициента материала. Последнее в особенности важно для дорогостоящих материалов, таких как титановые, кобальтовые сплавы, высоколегированные прецизионные сплавы.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) является одной из основных характеристик процесса пластической деформации, влияющих на формирование структурно-фазового состояния металла, что, в свою очередь, определяет его физико-механические свойства [6-9]. На НДС металла заготовки при РСП оказывает значительное влияние сложный характер распределения температуры в очаге деформации, формирующийся под влиянием контактного трения, деформационного разогрева, а также

теплообмена с рабочими инструментами и окружающей средой. Все эти условия в ходе процесса прокатки определяются совокупным влиянием параметров прокатки, таких как геометрические размеры рабочих валков и их калибровка, реологические и теплофизические свойства материала заготовки и валков, температура прокатки, коэффициент вытяжки, скорость прокатки, диаметр и длина заготовки, и др. Например, при высоких коэффициентах вытяжки и значительных скоростях прокатки при РСП отмечается существенный деформационный разогрев, степень которого зависит также от размеров заготовки, исходной температуры деформации, калибровки инструмента и других факторов [4, 10, 11].

В данной главе рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на характеристики прутков, полученных способом РСП. В контексте данной работы под качеством прутков из титановых сплавов подразумеваются не все характеристики продукции, а основные предъявляемые в НД на данный вид продукции в соответствии с ГОСТ 26492-85 - механические свойства и параметры структуры (балл зерна). Также, в рамках исследования, предполагается проанализировать влияние параметров деформационной обработки на точность прутков (овальность, отклонение по диаметру).

1.1.1 Геометрические характеристики прутка

Овальность является одной из характеристик, отражающих геометрическую точность прутка и определяемых настройкой валков на заданный калибр, а также их калибровкой [12, 16]. Меньшая овальность обеспечивает повышение коэффициента использования материала и исключает необходимость проведения дополнительных операций правки.

Глубина и форма концевых утяжек прутков являются важными параметрами при оценке экономической эффективности процесса прокатки, поскольку данная часть представляет собой объём металла, не входящий в годную часть полуфабриката и который будет удален на финишном (или промежуточном) этапе отделки. Также форма утяжки характеризует некоторые особенности НДС и температурного поведения на нестационарной стадии процесса. Согласно результатам работы [17], увеличение коэффициента вытяжки μ приводит к росту длины утяжки и одновременному уменьшению её объема. Кроме того, температура заготовки перед каждым проходом оказывает значительное влияние на утяжку: при прокате без промежуточного подогрева между проходами размер утяжки меньше, чем у прутков, прокатных при одинаковой температуре в каждом проходе.

1.1.2 Температурное поле прутка

Распределение температуры по объему прутка является одним из решающих факторов, определяющих формирование его механических свойств и структуры.

Существенные градиенты температур по поперечному сечению и длине приводят к анизотропии свойств. Поэтому тщательное исследование влияния параметров прокатки на формирование температурного поля прутка в данной работе является актуальной задачей, в особенности для прутков малого и среднего диаметра.

Чувствительность структурно-фазового состава и свойств двухфазных титановых сплавов к параметрам термо-деформационной обработки в сочетании со сложностью температурных условий процесса РСП обуславливают необходимость контроля температуры в процессе прокатки титановых прутков. В общем виде, зависимость температуры прутка от различных факторов можно представить в виде функции:

$$T_{\text{пр}} = f(T_3, \mu, n, D_3, L, \beta, D_v, T_v, \dots), \quad (1.1)$$

где T_3 – температура заготовки, °C;

μ – коэффициент вытяжки;

n – частота вращения валков, об/мин;

D_3 – диаметр заготовки, мм;

L – длина заготовки, мм;

β – угол подачи, град.;

D_v – диаметр валков, мм;

T_v – температура валков, °C.

Каждый из этих факторов вносит свой вклад и определяет температурное поле прутка. В зависимости от сочетания этих параметров температура прутка в процессе РСП может как повышаться, так и понижаться относительно исходной температуры нагрева.

С другой стороны, температура прутка связана с условием теплообмена с окружающей средой, включая теплотери за счет конвекционного тепловыделения металла с окружающей средой (ΔT_k , °C), контактного теплообмена заготовки с валками (ΔT_v , °C), и излучения тепловой энергии ($\Delta T_{\text{и}}$, °C). Кроме того, происходит разогрев за счет энергии пластического деформация в ОД (ΔT_d , °C) и разогрев от внешнего трения на поверхности при повышенном скольжении ($\Delta T_{\text{тр}}$, °C). Таким образом, изменение температуры прутка в ходе прокатки (T_1) будет складываться из составляющих притока тепла и отвода тепла, и определяется общей формулой теплового баланса [18, 19]:

$$T_1 = T_0 - \Delta T_{\text{и}} - \Delta T_k - \Delta T_v + \Delta T_d + \Delta T_{\text{тр}} \quad (1.2)$$

Прямое экспериментальное определение теплового состояния проката в процессе РСП прутков является крайне сложным, а в случае трехмерной постановки задачи практически невыполнимым. Для решения данной задачи может быть использован метод конечных элементов с применением уравнений теплопроводности при условии учета теплофизических свойств материала заготовки и инструмента, а также адекватности разработанной модели, которая должна быть проверена и подтверждена путем сравнения с экспериментальными результатами.

Результаты моделирования процесса РСП для алюминиевого сплава Al-Mg-Sc и сплава Co-Cr-Mo показали, что температура нагрева заготовки и частота вращения валков оказывали наибольшее влияние на распределение температуры по сравнению с другими параметрами процесса [4, 20]. При низких скоростях деформации (или частоте вращения валков) температура прутка в центре выше, чем на его поверхности, что связано с более длительным контактом между заготовкой и рабочим инструментом. При высоких скоростях деформации диапазон колебаний температуры уменьшается, т.к. существенно сокращается время каждого цикла деформации, а также снижается время контакта поверхности заготовки с инструментом, из-за чего после прокатки поверхность имеет более высокую температуру, по сравнению с осевой зоной [20, 21].

Начальная температура нагрева заготовки оказывает заметное влияние на распределение температуры и деформации в объеме прокатанного прутка. Авторами [4] показано, что путем её регулирования возможно осуществлять управление структурным состоянием получаемого прутка с целью достижения необходимых свойств. Снижение температуры нагрева при РСП заготовок из алюминиевых сплавов приводит к повышению неоднородности распределения поля накопленной степени деформации по поперечному сечению прутка [11, 17, 21].

Влияние температуры рабочего инструмента на температуру поверхности заготовки выражено не ярко и ограничивается её поверхностным слоем [4]. Наиболее заметны изменения при температуре валков, равной температуре окружающей среды (20 °С). Теплообмен между валком и заготовкой приводит к увеличению перепада температур по ее поперечному сечению и разнице условий деформации между передним и задним концом [4]. Частично избежать резкого снижения температуры поверхности прутка при контакте с валками позволяет их предварительный подогрев [4]. Однако на практике нагрев валков станов винтовой прокатки до высоких температур приводит к их интенсивному износу, и как следствие, сокращению срока службы, а также снижает качество поверхности проката за счет формирования дефектов в виде налипания, плен, вмятин и др. В связи с этим в производственных условиях рабочие валки (особенно министанов РСП, имеющих

небольшой диаметр 70...100 мм) не нагревают дополнительно, а напротив, охлаждают в паузах между проходами. Тем не менее при анализе температурных условий деформации стоит учитывать разогрев инструмента и его влияние на геометрию и точность прутка.

Коэффициент вытяжки (обжатие по диаметру) определяет не только величину деформации за один проход и суммарную, но влияет на цикличность процесса, изменение структуры, распределение температуры. Из уравнения теплового баланса (формула 1.2) видно, что величина обжатия – один из основных факторов, способствующих повышению температуры прутка в очаге деформации при РСП. Многочисленными исследованиями РСП жаропрочных, алюминиевых и титановых сплавов показано, что данное повышение может быть критичным для соблюдения температурного интервала деформации и получения качественного проката.

Размеры заготовки оказывают влияние на однородность распределения температуры по сечению и длине, что выражается в уменьшении колебаний температуры в поперечном сечении прутка с уменьшением его диаметра [4, 21]. При этом вдоль оси прокатки растет неоднородность распределения температуры. Авторами [4] для прокатки прутков малых диаметров из сплавов Co-Cr-Mo, требующих поддержания определенного диапазона температуры деформации, предложено с каждым последующим проходом постепенно увеличивать скорость прокатки и производить дополнительный подогрев заготовки между проходами.

Авторами работы [22] установлено, что на равномерность распределения температуры по объему прутка оказывает влияние выбранная схема прокатки. Грибовидная схема положительно влияет на равномерность разогрева металла по сечению заготовки, что выражается в отсутствии разогретой центральной части в прутке, характерной для чашевидной схемы.

В диссертационной работе Алексеева П.Л. [23] было проведено исследование влияния параметров РСП на характеристики теплового поля заготовки из титанового сплава ВТ6 диаметром 70 мм. Увеличение длины калибрующего участка рабочего вала приводит к увеличению количества циклов обжатия в каждом проходе и к росту тепловыделения. Повышение частного обжатия в каждом цикле деформации способствует более равномерному распределению температуры за счет углубления зоны максимального тепловыделения в сторону оси прутка. Деформационный разогрев возрастает с увеличением коэффициента вытяжки за проход, что ограничивает выбор этого параметра при прокатке в области $\alpha+\beta$ для двухфазных титановых сплавов. Увеличения угла подачи вызывает рост частного обжатия и одновременно уменьшает количество циклов деформации в проходе, что приводит к более равномерному распределению температуры

по поперечному сечению прутка и незначительному повышению температуры. В рамках выполненного исследования [23] показано, что увеличение частоты вращения валков не оказывает значительного эффекта на интенсивность разогрева металла заготовки при деформации, однако влияет на условия теплообмена на контакте заготовка/инструмент и также сокращает время прохождения заготовки через очаг деформации (ОД). Для титанового сплава ВТ6 повышение скорости прокатки (скорости деформации) приводит к росту деформационного разогрева на 15 % вследствие увеличения сопротивления деформации данного сплава на ту же величину. В многопроходной прокатке 5...10 секундные паузы между проходами без промежуточного нагрева способствуют выравниванию температуры по объему прутка. Разработанное распределение коэффициентов вытяжки по проходам приводит к смещению зоны максимального тепловыделения на разные расстояния от оси прутка, предотвращая концентрацию тепловыделения на одной глубине от поверхности прутка.

1.1.3 Скоростные параметры РСП

Машинное время прокатки является одним из основных скоростных параметров, который определяет производительность оборудования. Этот параметр зависит от нескольких факторов, в том числе от условий скольжения в очаге деформации, угла подачи (шага винтовой линии), частоты вращения валков и др. Коэффициент осевой скорости – параметр, характеризующий условия скольжения металла в очаге деформации в осевом направлении и в значительной степени определяющий производительность и энергоемкость процесса. Коэффициент тангенциальной скорости – деформационно-скоростной параметр, характеризующий условия вращения заготовки в очаге деформации и стабильность прокатки. Высокое скольжение также будет значительным образом влиять на температурные условия прокатки за счет дополнительного разогрева в очаге деформации или, наоборот, захлаживания заднего конца при увеличении времени прокатки.

Таким образом, экспериментальные исследования данных параметров являются важной задачей для понимания влияния режимов прокатки на данные параметры.

Согласно работе [24], схема прокатки оказывает влияние на скоростные параметры процесса винтовой прокатки: при чашевидной схеме средние значения коэффициентов осевой и тангенциальной скорости выше, чем при грибовидной схеме. Это объясняется тем, что при чашевидной схеме заготовка проходит очаг деформации с участка валка большего диаметра на меньший, что приводит к ее ускорению. При грибовидной схеме заготовка поступает в ОД с участка наименьшего диаметра и затем замедляется из-за следующего участка валка наибольшего диаметра. Для РСП прутков из титановых сплавов данные о

влиянии параметров процесса на условия скольжения в очаге деформации слабо освещены или отсутствуют.

В работе [11] рассмотрено влияние температуры нагрева заготовки на скоростные параметры при РСП для алюминиевого сплава Al-Zn-Mg-Ni-Fe и установлено, что уменьшение температуры заготовки приводит к снижению значений компонентов скорости движения металла заготовки. Уменьшение температуры нагрева с 500 до 400 °С приводит к уменьшению осевой составляющей скорости на 33,4 %, тангенциальной – на 11,3 %, а общая скорость снижается на 14,2 %.

На основе проведенного анализа можно резюмировать, что свойства получаемых методом РСП прутков зависят от многих факторов, одновременно действующих в процессе деформации. Варьирование параметров РСП позволяет реализовать различные режимы деформации, что, в свою очередь, обеспечивает изготовление продукции с требуемыми свойствами [25, 26]. Однако в условиях производства большое количество возможных вариантов режимов прокатки, а также требуемые временные затраты влекут за собой существенные вложения и повышенную вероятность получения некачественной продукции. Большая часть работ, посвященных моделированию температурных условий РСП прутков, не имеет экспериментальной верификации, а выполненные экспериментальные исследования РСП титановых сплавов в основном относятся к получению прутков диаметром более 40 мм. Это подтверждает актуальность создания расчетных моделей для управления процессом деформации (РСП) прутков диаметром 60 мм и менее из титановых сплавов.

1.2. Системы контроля температуры проката

В металлургическом производстве широко применяются системы автоматического регулирования параметров технологического процесса (температуры, давления, скорости, размеров, расхода вещества и др.) с целью обеспечения оптимального функционирования объекта управления [27,28].

Несмотря на непрерывность совершенствования систем автоматического управления, их принципиальные этапы являются следующими:

1. Оснащение агрегатов контрольно-измерительными приборами;
2. Применение устройств дистанционного управления, обеспечивающих задание и контроль значений управляемых параметров работы агрегатов;
3. Автоматическое регулирование отдельных параметров технологического процесса;

4.Использование систем управления, объединяющих несколько регулируемых параметров для достижения заданной цели работы агрегата;

5.Интеграция комплексных систем управления, при которой управляющая вычислительная машина (УВМ) координирует работу всех подсистем для достижения общей цели работы агрегата;

6.Разработка систем управления производственными процессами, организующих деятельность цеха, завода или целой отрасли промышленности.

Измерительные приборы являются одним из ключевых элементов систем управления технологическими процессами, поскольку обеспечивают получение информации о состоянии управляемого процесса, а именно, значение (управляемых/контрольных) параметров. Скорость и точность измерений относятся к основным факторам, определяющим скорость/точность процесса управления.

Приборы для измерения температуры подразделяются на три основных типа: контактные, термоэлектрические пирометры и пирометры излучения [29].

Контактные измерения основаны на принципе измерения линейного расширения твердого тела в зависимости от изменения его температуры. Приборы, реализующие данный принцип, применяются для контроля предельных температур, а также в схемах автоматического регулирования, например, при контроле температуры растворов в травильных ваннах и технологической смазки.

К контактным средствам также относятся термометры сопротивления, принцип действия которых основан на изменении электросопротивления металлов при изменении их температуры, таких как медь и платина. Такие приборы используются для измерения температуры воды, пара и газа в печах прокатных цехов, а также температуры масла в циркуляционных системах прокатных станов.

Термоэлектрическим пирометром называют термопару с подключенным к ней измерительным прибором, обеспечивающим измерения в широком диапазоне температур (100...1300 °С) с высокой точностью и возможностью калибровки в заданных интервалах температур и автоматической записи. Данный тип пирометров служит для контроля температуры в различных зонах печей прокатных цехов, а также при измерении температуры заготовок или валков в промышленных и лабораторных условиях.

К бесконтактным методам измерения температур относятся пирометры излучения, которые действуют на основе зависимости параметров яркости, теплового излучения, распределения энергии по спектру излучения от температуры тела. В рамках данного подхода выделяют следующие основные методы:

1. Оптический метод, основанный на изменении яркости тела при определенной длине волны в зависимости от температуры.

2. Метод радиационной пирометрии (инфракрасные пирометры) базируется на зависимости общей энергии, излучаемой телом от его температуры.

3. Метод цветовой пирометрии, при котором измерение температуры тела происходит на основе изменения распределения энергии внутри данного участка спектра его излучения.

В рамках прокатного производства измерение температуры характеризуется рядом особенностей, связанных с условиями технологического процесса:

1. Широкий диапазон измеряемых температур: при холодной/теплой прокатке примерно 100...250 °C, а при горячей прокатке до 1200 °C (для легированных сталей, титана и др.).

2. Условие среды проведения измерений: наличие высокой влажности и водяного пара в области измерений (вследствие распыления воды для охлаждения валков), наличие взвешенных частиц окалины, создающих запыленность, или повышение температуры окружающей среды возле корпуса прибора до ~200 °C.

3. Вид и скорость перемещения заготовки в зоне измерения (колебания проката).

4. Наличие окалины на поверхности заготовки.

Указанные выше особенности методов измерения температур в совокупности с параметрами и ограничениями каждого конкретного процесса прокатки являются ключевыми критериями при выборе измерительного прибора для достижения требуемых точности и скорости измерения. В данной работе предполагается измерение температуры поверхности заготовки перед станом и прутков из титановых сплавов на выходе из очага деформации. Исходя из поставленных задач, сформулированы требования для измерительного прибора:

1. Возможность бесконтактного измерения температуры непосредственно в процессе прокатки на расстоянии 0,5...2 м;

2. Диапазон измерения температур: 600...1200 °C;

3. Возможность стабильного измерения цилиндрических движущихся тел диаметром более 10 мм;

4. Наличие интерфейса подключения к ПК для фиксации, сохранения и последующего анализа данных измерения;

5. Точность измерения не ниже ± 1 °C, время измерения не ниже 0,1 с;

6. Стабильность измерения при наличии частиц окалины и паров жидкости.

Анализ доступных на рынке датчиков измерения температуры показал, что по совокупности требований подходящим прибором является бесконтактный ИК-пирометр.

Данные датчики просты в эксплуатации, надежны, имеют сравнительно низкую стоимость и широко используются в прокатном и металлургическом производстве для контроля температурных условий технологических процессов.

1.3. Выбор объекта исследования

В качестве объекта исследования в рамках диссертационной работы выбран промышленный двухфазный титановый сплав ВТ3-1 ($\text{Ti-6,3Al-2,5Mo-1,5Cr-0,5Fe-0,3Si}$) [1]. Свойства данного сплава являются структурно чувствительными, а получение заданного типа структуры существенно зависит от режимов термической и деформационной обработки. При этом, как показывает практика, невозможность достижения требуемых свойств может зависеть от некорректно выбранного температурного диапазона деформации в пределах 10...20 °С.

1.3.1 Применение

Широкое применение двухфазных титановых сплавов обусловлено высоким уровнем их эксплуатационных свойств, таких как высокая прочность, коррозионная стойкость и относительно малый удельный вес. Данная группа материалов особенно востребована в производстве деталей авиационных и судовых двигателей, элементов внутренней и внешней обшивки самолетов и корпусов автомобилей [30-34].

Сплав ВТ3-1 не уступает по свойствам стали, обладая при этом значительно меньшей плотностью, благодаря чему применяется для изготовления ответственных деталей авиационного двигателя [35]. Данный сплав обладает хорошей свариваемостью, что также расширяет возможности его применения [36].

1.3.2. Формирование структуры и свойств

Отличительной особенностью $\alpha+\beta$ -титановых сплавов является тесная взаимосвязь между структурно-фазовым состоянием и свойствами. Формирование структуры происходит в процессе термдеформационной обработки и, в значительной степени, зависит от её параметров. Принято условно выделять 5 видов микроструктур: глобулярная, переходная, смешанная, корзиночная, пластинчатая (рисунок 1.1) [37].

Получение определенного типа микроструктуры достигается путем обработки в диапазоне температур одной из фазовых областей титанового сплава: области существования α -фазы, области существования β -фазы или области полиморфного превращения, в которой существуют обе фазы.

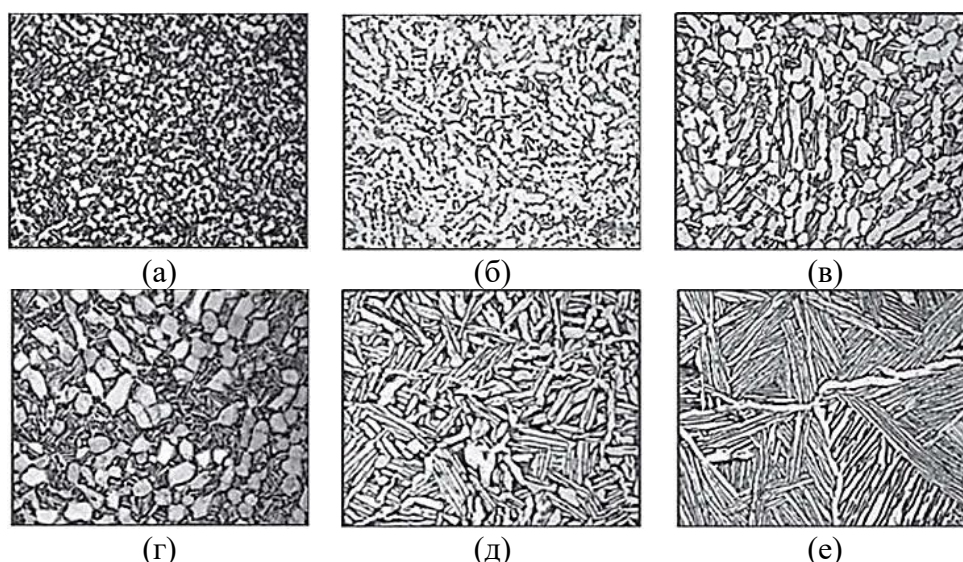


Рисунок 1.1 – Основные типы микроструктуры прутков из $\alpha+\beta$ сплавов после отжига, $\times 450$: глобулярная структура (а); переходная структура (б); смешанная структура (в, г); корзиночная структура (д); пластинчатая структура (е) [37]

Диапазон полиморфного превращения отличается для каждого сплава и зависит от содержания легирующих элементов. Для сплава ВТЗ-1 данный диапазон составляет $960\ldots 1000^\circ\text{C}$ [38]. На рисунке 1.2 показана фазовая диаграмма системы Ti-Al [39]. При увеличении содержания алюминия происходит расширение переходного интервала между α - и β -областью.

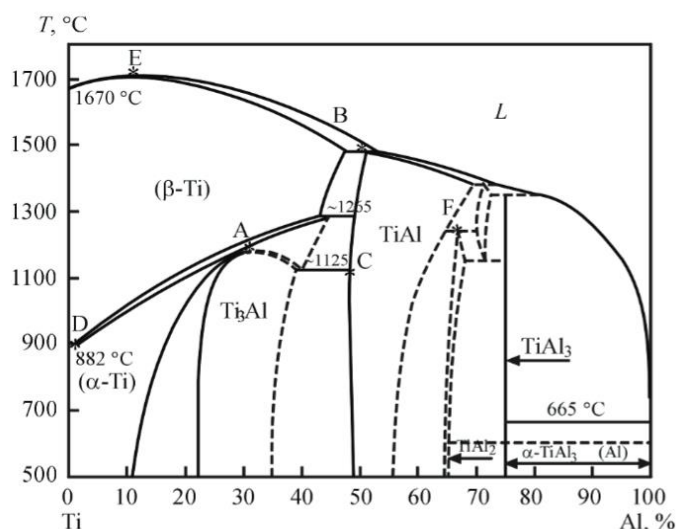


Рисунок 1.2 – Фазовая диаграмма системы Ti-Al [39]

Глобулярная структура формируется при деформации в $\alpha+\beta$ -области. При приближении к температуре полиморфного превращения возможно достижение образования структуры корзиночного строения. Деформация при температурах, соответствующих β -области, приводит к появлению пластинчатой структуры [37, 40].

Свойства сплава в различной степени подвержены влиянию структурного состава сплава. Выявлено, что мелкозернистая глобулярная структура проявляет более высокие пластические свойства, чем пластинчатая, однако они имеют практически одинаковый уровень предела прочности и текучести [37, 40, 41]. При рассмотрении свойств сплава с пластинчатой структурой важно обратить внимание на такие характеристики структуры, как размер α -колоний и толщина α -пластин внутри β -зерна. Укрупнение этих структурных единиц негативно влияет на прочностные свойства. Прослеживается следующая зависимость между данными параметрами структуры: при росте размеров колоний происходит утолщение пластин [42].

Уровень усталостных свойств определяется характером распространения трещин в структуре. Так, пластинчатая структура уступает глобулярной по пределу выносливости, однако превосходит её по вязкости разрушения и жаропрочности [42].

1.4. РСП двухфазных титановых сплавов

На сегодняшний день для производства прутков круглого сечения из титановых сплавов применяются методы продольной сортовой прокатки, прессования и радиально-сдвиговой прокатки. РСП является современным и технологичным способом, доказавшим свою эффективность [25, 43-47].

На Верхне-Салдинском металлургическом производственном объединении (ВСМПО) были проведены первые исследования деформации заготовок из титановых сплавов методом винтовой прокатки на агрегате 40-80 с углом подачи 12° [48-51], предназначенном для производства труб из титановых сплавов и включавшем две клетки (прошивную и раскатную). В дальнейшем данный агрегат был использован для получения прутков с делением клеток на черновую и чистовую.

Комплексные исследования показали, что винтовая прокатка обеспечивает высокую степень проработки макроструктуры по поперечному сечению и длине прутка без трещин или макро-/микронесплошностей. Также достигается высокая равномерность механических свойств (разница не превышала 5...10 % по сечению и 2...3 % по длине). С точки зрения геометрических размеров, прутки, полученные данным методом, отличаются от полученных продольной прокаткой отсутствием овальности и лампасов, а также отклонением по диаметру в 3...5 раза меньше [50].

Успешная эксплуатация агрегата 40-80 привела к проектированию в 1989 году специализированного стана радиально-сдвиговой прокатки СРВП-130 для производства высококачественных прутков из титановых сплавов. В отличие от 40-80 он позволил реализовать реверсивную прокатку при больших углах подачи ($20-40^\circ$) [52-56], расширить

область применения на все титановые сплавы, включая двухфазные высокопрочные, требующие деформации ниже температуры полиморфного превращения [57]. Путем рационального выбора термо-деформационных режимов, данное оборудование обеспечило получение прутков с глобулярной структурой, соответствующей требованиям отечественных и зарубежных стандартов [58, 59]. Далее на ВСМПО совместно с ЭЗТМ и учеными МИСИС, а также на ОАО «Чепецкий механический завод» создано и введено в эксплуатацию оборудование министанов с высокой степенью автоматизации РСР-10 и РСР-8 [60].

В работе [34] приведен пример комбинации РСР с последующей сортовой прокаткой. Данное решение позволило получить прутки из сплава ВТ6, обладающий прочностными свойствами, приближенными по значениям к свойствам материала с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Анализ результатов позволяет сделать вывод о целесообразности применения описанной методики для повышения прочности двухфазных титановых сплавов.

В результате РСР титанового сплава ВТ6 была отмечена неоднородность размера зерна макроструктуры в поперечном сечении, размер β -зерна вблизи поверхности прутка в 5 раз меньше, чем в осевой зоне. Также зерна α -фазы в центре крупнее, чем в приповерхностных слоях. Выявлена возможность управления толщиной слоев с различным размером зерна путем варьирования кинематических и деформационных условий РСР [61].

1.5. Применение цифровых моделей и методов машинного обучения в прокатном производстве

Сложность технологических процессов обработки металлов давлением, в частности РСР, и большое количество факторов, влияющих на температурное и деформированное состояние заготовки в ходе деформации, затрудняют точный оперативный контроль параметров процесса с целью обеспечения требуемого уровня качества продукции. Сбор и анализ изменения температуры, силовых параметров, скорости заготовки, времени, геометрических размеров и других параметров технологического процесса позволяют внести корректировки в настройки оборудования [62].

В прокатном производстве температурно-скоростные и деформационные параметры являются основными факторами, определяющими производительность и качество производимой продукции. Контроль и регулирование температуры на основных этапах технологического процесса позволяет получить стабильность результатов и сократить издержки производства [63-65]. В условиях реальной эксплуатации таких сложных технических систем как современные трехвалковые станы винтовой прокатки

эффективным методом анализа параметров может являться математическое моделирование.

Использование цифровых моделей (ЦМ), созданных на основе математического моделирования, позволяет совершенствовать процесс, эффективно управлять его параметрами, повышать стабильность и качество продукции [66, 67].

Кроме того, ЦМ дает возможность прогнозирования возникновения дефектов в заготовке, оценки силовых параметров процесса, напряженно-деформированного состояния инструмента и заготовки и др. [8, 11, 68-71]. В промышленности часто при помощи моделирования решается проблема оптимизации процессов или проверки новых решений: все планируемые изменения проходят апробацию на цифровой модели [72]. Также моделирование помогает решить задачу обоснования и расчета режимов деформации, что упрощает обработку материалов, свойства которых в значительной степени зависят от параметров процесса, таких как, двухфазные титановые сплавы, характеризующиеся различным фазовым составом и свойствами при разных температурах [41].

В последние годы методы машинного обучения (ML) рассматриваются как перспективное направление для оптимизации и решения инженерных задач в области обработки материалов [73-75]. Модели, обученные на данных численных расчетов или экспериментов, способны выявлять сложные нелинейные зависимости между входными параметрами процесса и выходными характеристиками, обеспечивая практически мгновенное получение прогнозов после этапа обучения [74, 76]. В задачах обработки металлов давлением методы ML успешно применялись для прогнозирования сопротивления деформации [77-86], усилий формоизменения [87-90], температурных полей и характеристик микроструктуры с достаточно высокой точностью [91, 92], а также механических свойств изделий, полученных ОМД [93-95]. Далее представлены некоторые примеры применения алгоритмов и методов ML для решения задач ОМД в промышленности.

Авторы работы [96] применили генетический алгоритм для многоцелевой оптимизации энергопотребления и развития дефектов для тандемного прокатного стана холодной прокатки. В результате это позволило операторам стана выбирать наиболее подходящий оптимизированный маршрут прокатки и обеспечило снижение доли дефектов на 18 %.

В работах [97, 98] описано планирование производственного процесса с использованием генетического алгоритма для достижения равномерного распределения

мощности между клетями при холодной прокатке с соблюдением максимально безопасного уровня натяжения полосы и требуемой плоскостности.

Для решения проблемы разностенности при производстве труб авторами [99] был проведен мониторинг вибрации стана в процессе прошивки. Затем была определена связь между зафиксированным уровнем вибрации стана и качеством изделий, после чего были созданы контрольные карты Hotelling T². С их помощью была получена возможность обнаружения отклонений и предотвращения дефектов на ранней стадии прошивки.

В работах [100, 101] описана полная методика выполнения оптимизации процесса холодной прокатки полосы с целью уменьшения вибрации. Авторами работы [100] были предприняты следующие шаги:

1. Построение инженерной модели;
2. Получение данных на основе центрального композиционного плана или метода Тагучи;
3. Получение корректной математической формулы для инженерной модели;
4. Поиск оптимального решения с использованием генетического алгоритма и нейросетевого метода.

Выявление взаимосвязей между параметрами процесса и его стабильностью позволило повысить производительность, а также произвести выбор оптимальных параметров процесса с точки зрения соотношения скорости прокатки и разнотолщинности полосы. Наибольшее увеличение скорости было отмечено в результате применения генетического алгоритма.

В работе [101] представлена методика выявления и подавления вибраций, приводящих к снижению качества продукции. Создание цифрового двойника позволяет сопоставлять рабочие параметры с контрольными значениями, тем самым производя контроль вибрации прокатного стана (рисунок 1.3).

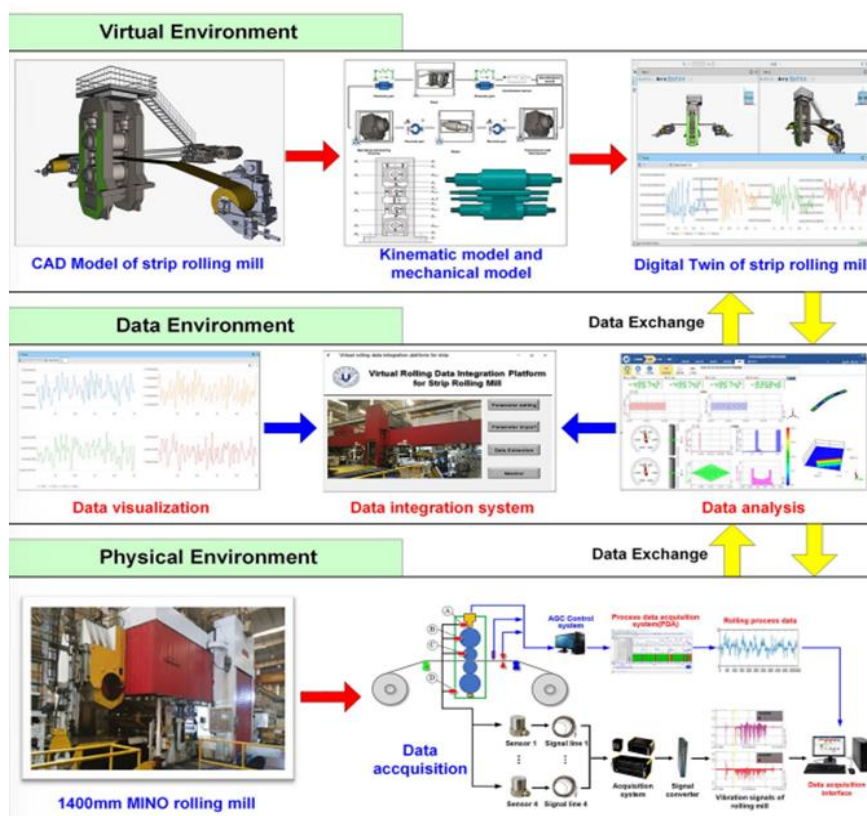


Рисунок 1.3 – Теоретическая основа системы цифрового двойника [101]

Интенсивность вибрации системы определяется по установленной взаимосвязи с колебаниями усилия прокатки.

Описанные примеры показывают эффективность применения цифровых моделей, цифровых двойников и алгоритмов на основе ML для оптимизации различных характеристик технологического процесса прокатки (точности геометрических размеров, распределения или снижения усилий, контроля температуры, улучшения качества поверхности и др.). Однако на данный момент отсутствуют подобные модели для процессов винтовой прокатки прутков и труб. На основании изложенного выше, интеграция МКЭ-моделирования и машинного обучения представляется перспективной для прогнозирования температурных и деформационных параметров радиально-сдвиговой прокатки титановых сплавов. МКЭ может использоваться для генерации наборов данных в широком диапазоне технологических условий, тогда как модели машинного обучения позволяют обобщать эти данные и обеспечивать быстрые прогнозы, пригодные для задач оперативного управления процессом и его оптимизации. В этой связи одной из задач диссертационной работы является разработка предиктивной модели температурно-деформационных параметров процесса РСП титанового сплава на основе данных МКЭ, верифицированных на основе экспериментальных прокаток, и методов машинного обучения.

Выводы по главе 1

В данной главе представлен литературный обзор особенностей процесса РСП при получении полуфабрикатов из двухфазных титановых сплавов, рассмотрены область применения и свойства объекта исследования, а также описано применение цифровых моделей и методов машинного обучения в прокатном производстве.

1. В результате анализа выявлено определяющее влияние температуры нагрева заготовки под прокатки, коэффициента вытяжки, геометрических размеров заготовки и калибровки рабочих валков на качество и точность прутков, полученных способом РСП. Так же обоснована актуальность создания расчетных моделей для управления процессом РСП.

2. Несмотря на широкое применение двухфазных титановых сплавов, в частности ВТЗ-1, контроль их макро- и микроструктуры и свойств при производстве деформированных полуфабрикатов остается сложной задачей. Особую актуальность представляет изучение и совершенствование режимов РСП для длинномерных прутков малого диаметра.

3. Обзор применения цифровых моделей для совершенствования процессов деформации подтвердил эффективность использования МКЭ для генерации наборов данных в различных технологических условиях, что позволяет с помощью моделей машинного обучения получать прогноз результатов для оперативного управления и оптимизации процесса деформации.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Целью экспериментального исследования является получение экспериментальных данных о характеристиках процесса прокатки (температурное поле, токовая нагрузка на привод) и полученного прутка (геометрия, структура материала). Для определения ограничений исследования необходимо учитывать характеристики оборудования, на котором проводятся эксперименты.

2.1. Материалы и методы исследования

2.1.1. Станы РСП

Экспериментальные исследования процесса РСП титановых сплавов проводились на опытно-промышленных трехвалковых станах винтовой прокатки в условиях НПЦ ОМД НИТУ МИСИС. Для получения требуемой информации о фактических характеристиках прокатки, таких как частота вращения валков, время прокатки и токовая нагрузка на привод, электродвигатели стана были подключены к преобразователям частоты.

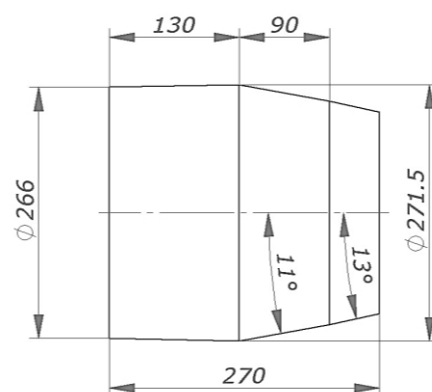
Ниже приведены краткие технические характеристики каждого из используемых прокатных станов и характеристики его преобразователя частоты.

1) Трехвалковый стан винтовой прокатки МИСИС-130Т

Оборудование предназначено для прокатки сплошных заготовок в прутки круглого сечения, изготовленных из различных видов металлов и сплавов: углеродистых и легированных сталей, жаропрочных никелевых сплавов, а также сплавов на основе титана, алюминия и меди. Внешний вид стана и геометрия его рабочего валка представлена на рисунке 2.1. Технические характеристики оборудования приведены в таблице 2.1.



(а)



(б)

Рисунок 2.1 – Трехвалковый стан МИСИС-130Т (а) и геометрия рабочего валка (б)

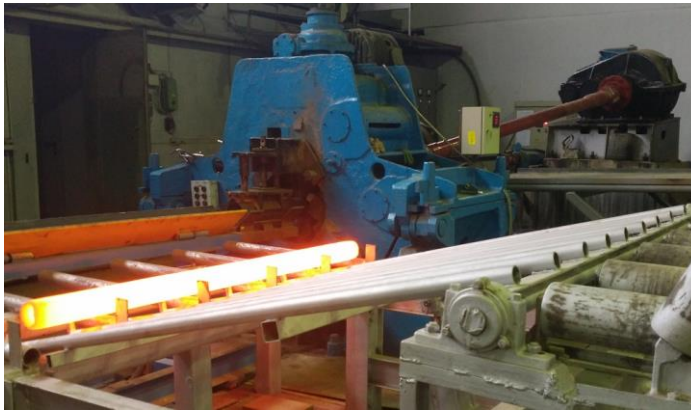
Таблица 2.1 – Технические характеристики стана МИСИС-130Т

Наименование параметра		Значение	
		минимум	максимум
Размеры исходной заготовки	диаметр, мм	50	210
	длина, мм	200	1600
Размеры конечного прутка	диаметр, мм	180	40
	длина, мм	300	6000
Угол подачи, град		10	21
Рабочий валок	диаметр в пережиме, мм	300	
	длина бочки валка, мм	270	
	угол раскатки, град	10	
	радиальное усилие металла на валок, кН	До 1000	
	максимальный крутящий момент на валке, т*м	2,5	
Тип главного привода		Индивидуальный	
Мощность привода, кВт		3 x 200	
Номинальная частота вращения двигателя, об/мин		990	
Передаточное число редуктора		12	
Частота вращения рабочих валов, об/мин	при частоте тока 10 Гц	16,5	
	при частоте тока 50 Гц	82,5	

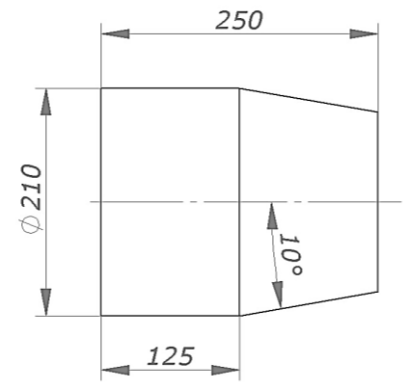
Для управления валками стана МИСИС-130Т использовались три преобразователя частоты (по одному преобразователю частоты на каждый валок). Для регулирования скорости вращения стандартных асинхронных двигателей стана, был использован частотный преобразователь модели EI-9011. Преобразователь поддерживает векторное управление потокоцеплением как с использованием обратной связи от энкодера, так и в безсенсорном режиме, а также стандартное скалярное управление по закону U/f (напряжение/частота).

2) Трехвалковый стан винтовой прокатки МИСиС-100Т

Стан служит для горячей прокатки металлических заготовок среднегабаритного круглого сечения. Оборудование позволяет обрабатывать широкий спектр материалов, включая углеродистые и легированные стали, жаропрочные никелевые сплавы, а также сплавы на основе титана, алюминия и меди. На рисунке 2.2 показан внешний вид стана и геометрия его рабочего валка. В таблице 2.2 представлены основные технические параметры прокатного стана МИСиС-100Т.



(а)



(б)

Рисунок 2.2 – Трехвалковый стан МИСиС-100Т (а) и геометрия рабочего валка (б)

Таблица 2.2 – Технические характеристики стана МИСИС-100Т

Наименование параметра		Значение	
		минимум	максимум
Размеры исходной заготовки	диаметр, мм	50	180
	длина, мм	200	1600
Размеры конечного прутка	диаметр, мм	160	40
	длина, мм	300	6000
Угол подачи, град		10	21
Рабочий валок	диаметр в пережиме, мм	290	
	длина бочки валка, мм	270	
	угол раскатки, град	10	
	радиальное усилие металла на валок, кН	До 1000	
	максимальный крутящий момент на валке, т*м	2,5	
Уравновешивающее устройство		Пружинного типа	
Тип главного привода		Индивидуальный	
Мощность привода, кВт		3 x 110	
Номинальная частота вращения двигателя, об/мин		1485	
Передаточное число редуктора		15,5	
Частота вращения рабочих валов, об/мин	при частоте тока 10 Гц	19,16	
	при частоте тока 50 Гц	95,8	

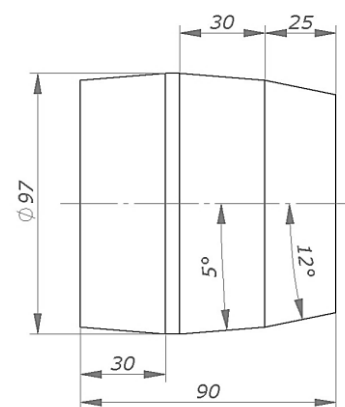
3) Трехвалковый министан винтовой прокатки 14-40

Министан 14-40 применяется для производства проката прутков малого диаметра из сплошных заготовок. Внешний вид стана и геометрия рабочего валка стана показаны на рисунке 2.3. Основные характеристики агрегата приведены в таблице 2.3.

Для управления частоты вращения валков был использован частотный преобразователь модели «Hyundai N700E-550HF/750HFP».



(а)



(б)

Рисунок 2.3 – Трехвалковый министан 14-40 (а) и геометрия рабочего валка (б)

Таблица 2.3 – Техническая характеристика стана РСП 14-40

Наименование параметра		Значение	
		минимум	максимум
Размеры исходной заготовки	диаметр, мм	20	42
	длина, мм	300	2000
Размеры конечного прутка	диаметр, мм	18	40
	длина, мм	до 3500	
Угол подачи, град		20	
Рабочий валок	диаметр в пережиме, мм	80	98
	длина бочки валка, мм	90	
	угол раскатки, град	7	
Тип главного привода		Индивидуальный	
Мощность привода, кВт		3 x 11	
Номинальная частота вращения двигателя, об/мин		1450	
Передаточное число редуктора		16,56	
Частота вращения рабочих валов, об/мин	при частоте тока 10 Гц	17,512	
	при частоте тока 50 Гц	87,56	

2.1.2. Система мониторинга характеристик процесса прокатки

В основе создания цифровой модели процесса РСП титановых прутков лежат полученные данные о температуре поверхности заготовки на входе в ОД, температуре поверхности прутка на выходе из очага деформации, частота вращения валков и время прокатки, энергосиловые параметры, а также геометрия получаемых прутков. Перечисленные параметры применяются для оценки промежуточной ЦМ с определенными настройками. Таким образом, приближение значений характеристик прокатки, полученных с использованием ЦМ, к экспериментальным говорит о повышении точности ЦМ, и наоборот, рост разности между данными ЦМ и измеренными при реальной прокатке указывает на снижение точности ЦМ. В связи с этим, надежность разработанной системы мониторинга и точность показаний его приборов имеют решающее значение при определении критериев оценки достоверности цифровой модели. Ниже приведено

описание основной аппаратуры и датчиков, используемых для разработки системы мониторинга характеристик процесса прокатки.

1) Пирометры

Для фиксации температуры заготовки/прутка на входе и на выходе из очага деформации были использованы инфракрасные (ИК) пирометры. При использовании ИК пирометров необходимо учитывать влияние окружающей среды (пар, окалина) на точность измерения и широкого спектрального диапазона в зависимости от материала и его коэффициента излучения. Для этого была проведена экспериментальная калибровка пирометров с целью определения коэффициентов излучения в зависимости от температуры нагрева, описанного в п. 2.2.

Для исследований использовался инфракрасный пирометр типа «Кельвин RXR-Pro 1600» (рисунок 2.4, а), технические характеристики которого представлены в таблице 2.4.

2) Преобразователь интерфейсов и протоколов

Для корректной связи датчиков с ПК использован преобразователь типа «ОВЕН AC4-M», предназначенный для взаимного преобразования сигналов интерфейсов USB и RS-485, обеспечивающий подключение ПК с USB-портом к промышленной сети RS-485 (рисунок 2.4, б).

3) Модуль ввода/вывода

Модуль аналогового ввода с быстрыми входами (AI) типа «ОВЕН MB110-хАС», предназначенные для измерения унифицированных аналоговых сигналов, преобразования измеренных величин в значения физических параметров и последующей передачи данных по сети RS-485 (рисунок 2.4, в).

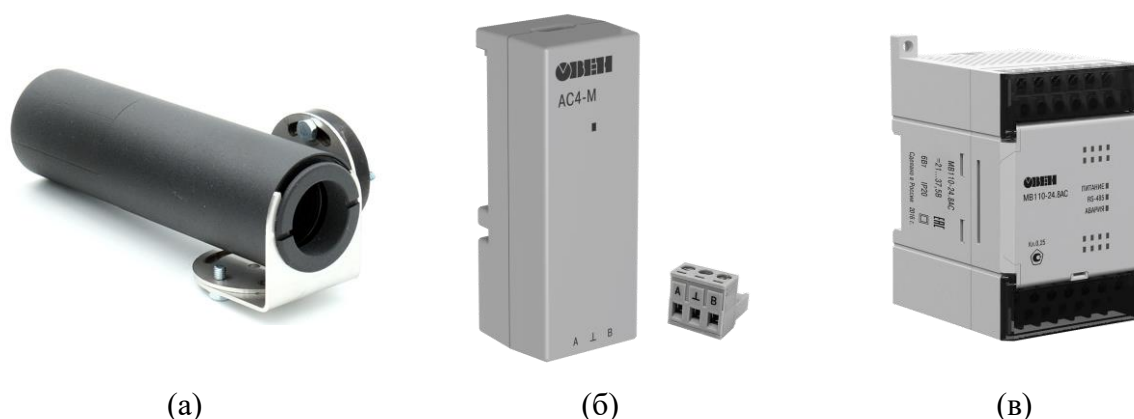


Рисунок 2.4 – Пирометр «Кельвин RXR-Pro 1600» (а); Преобразователь типа «ОВЕН AC4-M» (б); Модуль аналогового ввода с быстрыми входами (AI) типа «ОВЕН MB110-хАС»(в)

Таблица 2.4 – Технические характеристики пирометра «Кельвин RXR-Pro 1600»

Параметр	Значение
Диапазон измерения	От +400 °С до +1600 °С
Предел погрешности От +200 °С до +400 °С вкл. Св. +400 °С до +3000 °С	$\pm (T_{изм} * 0,1 + 2) \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm (T_{изм} * 0,1 + 1) \text{ } ^\circ\text{C}$
Разрешение по температуре	1 °С
Показатель визирования	1:200
Диапазон установки излучательной способности объекта	От 0,01 до 1,00
Время измерения	0,02 сек
Питание	24 В
Потребляемая мощность	Не более 0,2 В
Габаритные размеры	Не более Ø40 * 172 мм
Масса прибора	Не более 0,18 кг
Цифровой интерфейс	RS485, Modbus

4) Программная среда SCADA

В процессе эксперимента необходима не только фиксация, но и запись показаний температуры, токовой нагрузки и времени прокатки для дальнейшей ее обработки и анализа. Для данной цели использован интерфейс SCADA.

Несмотря на то, что существует множество надежных и эффективных SCADA-систем для различных промышленных применений в нефтегазовой отрасли, атомной энергетике (например, Trace Mode [102]) и даже металлургической промышленности, выбор системы «MasterSCADA» был обусловлен простотой ее использования, отсутствием необходимости в обширных навыках программирования, обширной библиотекой готовых команд и разумной ценой.

5) Схема подключения

Схема подключения системы мониторинга представлена на рисунке 2.5.

Компьютер подключается к двум источникам данных:

- Данные измерения температуры передаются от преобразователя интерфейса RS-485-USB «ОВЕН АС4-М», который обеспечивает связь пирометров с компьютерной системой через USB-порт;
- Данные токовой нагрузки и частоты вращения рабочих валков поступают от модулей «ОВЕН МВ110-хАС», преобразующих сигналы «токовая нагрузка» и «частота вращения валков» с частотных преобразователей в интерфейс RS-485-USB, а затем передают их в компьютерную систему через USB-порт.

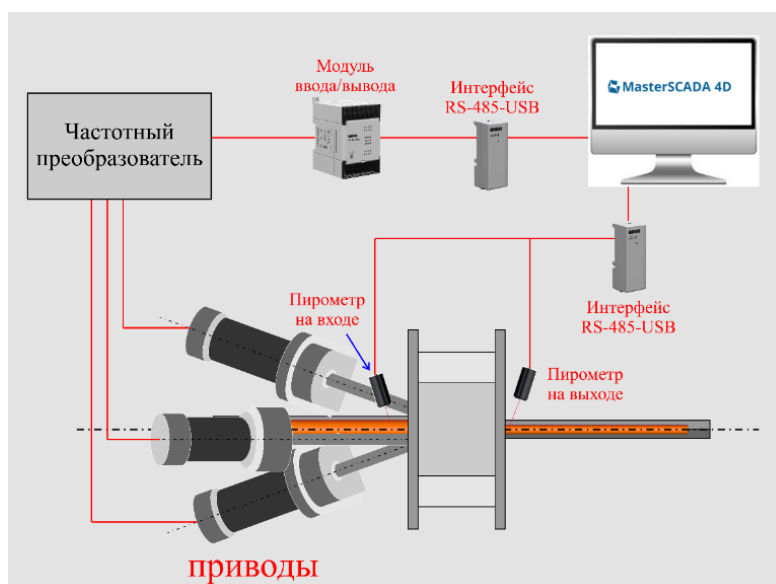


Рисунок 2.5 – Схема подключения системы мониторинга

Эти устройства обеспечивают надежную и гальванически изолированную передачу данных, позволяя интегрировать измерения в компьютерную систему для дальнейшего анализа и визуализации.

2.2. Экспериментальная тарировка системы контроля температуры

С целью определения коэффициентов излучения для исследуемых материалов при различных температурах, была проведена экспериментальная тарировка пирометров. Тарировка осуществлялась для титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ6 в условиях, максимально приближенных к тем, в которых будет проводиться экспериментальная прокатка, с целью обеспечения достоверности получаемых данных.

Порядок проведения эксперимента следующий:

1. Разработка цифровой среды в «MasterSCADA» для отображения результатов измерений пирометров с возможностью настройки коэффициента излучения материала до и во время измерений, а также отображением данных в режиме реального времени. Результаты фиксируются в таблицах и графиках для дальнейшего анализа;

2. Формирование аппаратной части системы мониторинга: подключение пирометров к источнику питания 24 В и интерфейсному преобразователю RS-485-USB, обеспечивающему связь с компьютерной системой через USB порт (рисунок 2.6, а);

3. Размещение пирометров на расстоянии 1 м от контрольной точки на приемном столе печи. Три пирометра производят одновременное измерение температуры образца (рисунок 2.6, в);

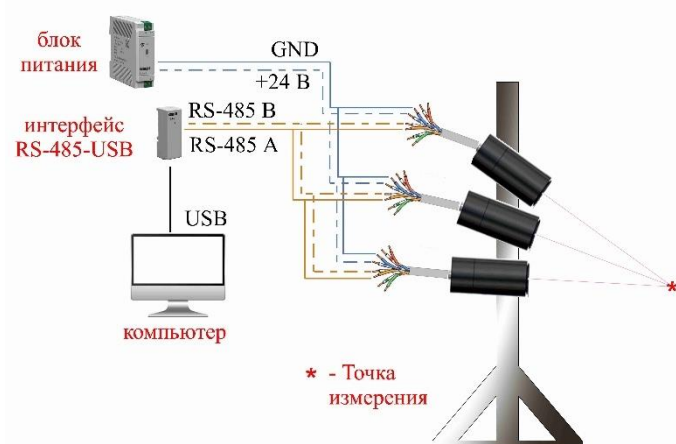
4. Выбор для измерений двух образцов из титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ6 (рисунок 2.6, б) и диапазона температур, при которых будут определяться коэффициенты излучения: 900, 1000, 1100, 1200 °С;

5. Нагрев образцов в печи до первой заданной температуры 900 °С на протяжении 1 часа;

6. Выдержка образцов в печи 30 минут для установления теплового равновесия с печью;

7. Проведение измерений температуры образца (рисунок 2.6, г);

8. Сравнение измеренных значений с данными цифровой среды, коррекция коэффициента излучения пирометра и повтор измерений до совпадения показаний с реальной температурой образца. При этом выдержка длится 10 минут для достижения стабильности температуры;



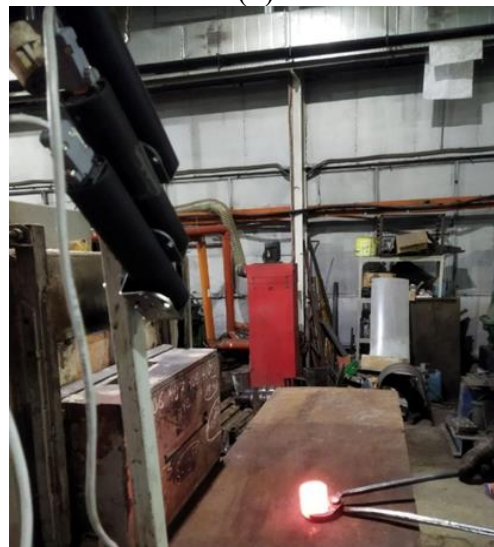
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2.6 – Этапы проведения эксперимента: Схема подключения пирометров к компьютеру и питанию (а); Образцы для измерения (б); Положение пирометров перед печью (в); Процесс измерения (г)

9. Аналогичные процедуры повторяются для оставшихся образцов с интервалом в 20 минут для стабилизации температуры;

10. Последовательное повышение температуры печи к следующим контрольным значениям с выдержкой 30 минут и повторением измерений для определения коэффициентов излучения при каждой температуре. Все данные фиксируются для последующей обработки.

Калибровка проводилась на трех пирометрах для исключения влияния производственных погрешностей, после чего для дальнейших измерений были выбраны два устройства с наиболее точными показаниями, близкими к фактическим значениям температуры.

Установленные коэффициенты излучения представлены в таблице 2.5. Для двух материалов коэффициент излучения изменяется наиболее существенно для диапазона температур 900...1000 °С, что соответствует интервалу температур полиморфного превращения.

Таблица 2.5 – Коэффициенты излучения заготовок из сплавов ВТЗ-1 и ВТ6

Температура нагрева образца, °С	Коэффициент излучения	
	ВТЗ-1	ВТ6
900	0,60	0,50
1000	0,53	0,63
1100	0,53	0,63
1200	0,57	0,63

Полученные данные являются важными для настройки пирометров и получения достоверных значений температур, т.к. они будут являться первичными данными для создания модели процесса РСП в QForm.

На рисунке 2.7 показаны результаты измерения температуры образца из сплава ВТЗ-1 с помощью каждого пирометра при различных температурах во время охлаждения на воздухе сразу после извлечения из печи. Аналогично для образца из сплава ВТ6 на рисунке 2.8. Все пирометры показывают одинаковый характер изменения температуры (скорости охлаждения). Кроме того, с повышением температуры нагрева отмечается рост скорости охлаждения, выраженный в большей величине наклона линий изменения температуры, что нагляднее всего наблюдается для сплава ВТ6 при температуре 1200 °С (рисунок 2.8, г). Различные колебания показаний температуры образцов, представленные на графиках, обусловлены неустойчивостью положения образца в зоне измерения. Измерения пирометров №2 и №3 демонстрируют большую точность по сравнению с

первым пирометром, поэтому именно эти устройства будут применяться в ходе экспериментальной прокатки.

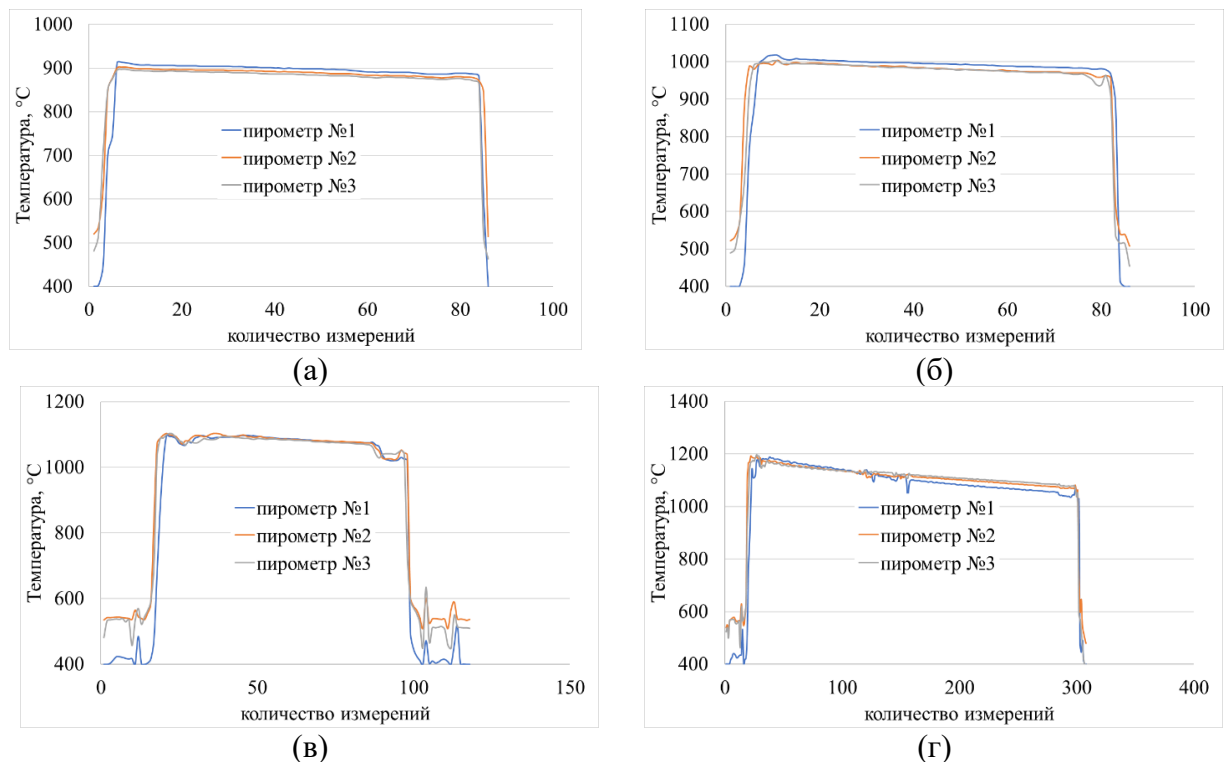


Рисунок 2.7 – Графики температуры образца из сплава ВТЗ-1 при температуре нагрева 900 °С (а); 1000 °С (б); 1100 °С (в); 1200 °С (г)

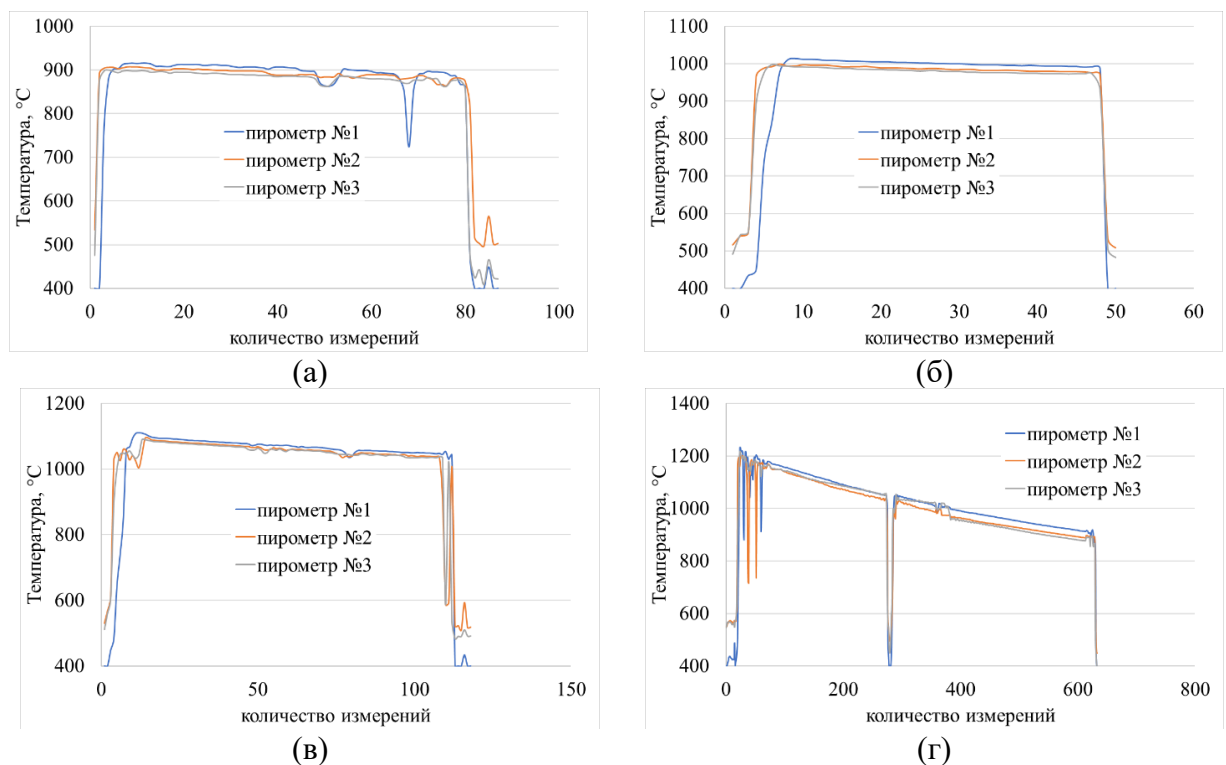


Рисунок 2.8 – Графики температуры образца из сплава ВТ6 при температуре нагрева 900 °С (а); 1000 °С (б); 1100 °С (в); 1200 °С (г)

2.3. Постановка задач и разработка плана эксперимента

2.3.1 Задачи исследования

Контроль микроструктуры и свойств является сложной задачей при производстве деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов. Поскольку тип и параметры микроструктуры оказывают значительное влияние на механические и эксплуатационные свойства материала, данная проблема приобрела особую актуальность. Управление структурой посредством деформационной и термической обработки позволяет изменять свойства сплавов в широких пределах, достигая сочетания характеристик, недоступных при использовании исключительно методов легирования.

Кроме того, как было показано в литературном обзоре, современные тенденции развития металлургической промышленности предполагают переход к интеллектуальным системам управления технологическими процессами и оборудованием, что позволяет снизить издержки производства, повысить качество продукции и улучшить ее характеристики, а также обеспечить стабильность производственного процесса, что дает конкурентные преимущества в условиях современной экономической ситуации.

С учетом озвученного выше, в рамках настоящей работы был разработан план исследований и поставлены следующие основные задачи:

1) Анализ процесса радиально-сдвиговой прокатки прутков из титановых сплавов с целью определения влияния ключевых технологических параметров на формирование структуры полученного прутка.

2) Получение экспериментальных образцов деформированных сплавов при различных режимах и параметрах, а также проведение анализа макро- и микроструктуры, включая оценку геометрических размеров прутков и особенностей формоизменения.

3) Обработка и интерпретация экспериментальных данных с целью выявления взаимосвязей между параметрами деформации, формированием температурного поля прутка и изменениями структуры.

4) Проведение комплексного моделирования процесса деформации на основе МКЭ в широком диапазоне температурных, деформационных, скоростных параметров, а также формирование и обработка полученного массива данных (поля температур, уровень деформационного разогрева, напряженно-деформированное состояние, скоростные и энергосиловые параметры, размер и форма концевых утяжек и др.).

5) Разработка предиктивной модели, позволяющей на основе исходных данных о режимах деформации прогнозировать температурно-деформационные параметры процесса радиально-сдвиговой прокатки.

Решение указанных задач позволит улучшить технологические процессы производства прутков малого и среднего диаметра из титановых сплавов, обеспечить автоматический выбор рациональных режимов и маршрутов деформации, а также эффективно управлять температурным режимом и прогнозировать микроструктурные характеристики с помощью корректировки параметров деформации.

2.3.2 Разработка плана эксперимента

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

В качестве исходной заготовки для экспериментальной прокатки использован пруток круглого сечения из сплава ВТЗ-1 диаметром 95 мм и длиной 1275 мм. Для металла заготовки был проведен химический анализ, результаты которого в сравнении с требованиями ГОСТ 19807–91 [103], представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Химический состав исследуемой заготовки

	Массовая доля элементов, %							
	Ti	Al	Mo	Zr	Cr	Si	Fe	Ост.
Заготовка	основа	6,86	3,64	0,067	1,43	0,257	0,299	0,565
ГОСТ 19807-91	основа	5,5-7	2,0-3	0,5	0,8-2	0,15-0,4	0,2-0,7	

Создание плана прокатки

План экспериментальных прокаток сплава ВТЗ-1 (рисунок 2.9) состоит из трёх основных этапов, на каждом из которых прокатка проводится на одном из трех типоразмеров прокатных станов. Прокатанные на первом стане МИСиС-130Т прутки используются в качестве исходных заготовок для последующего этапа прокатки на стане МИСиС-100Т, и так далее для третьего этапа прокатки.

Для каждого этапа прокатки проводится следующая последовательность:

- Нагрев в печи до температуры прокатки в течение 1...2 ч в зависимости от диаметра заготовки;
- Установка системы мониторинга характеристик процесса прокатки (рисунок 2.5) и ИК пирометров на входе и выходе из ОД, как предоставлено на рисунке 2.10;
- Прокатка заготовок по плану прокатки.

В многопроходных режимах предусмотрен подогрев прутка между проходами в течение 5...10 мин. При нагреве заготовка в печи всегда располагалась таким образом,

чтобы передний конец находился ближе к окну загрузки/выгрузки. На всех этапах деформация производилась с сохранением направления прокатки.

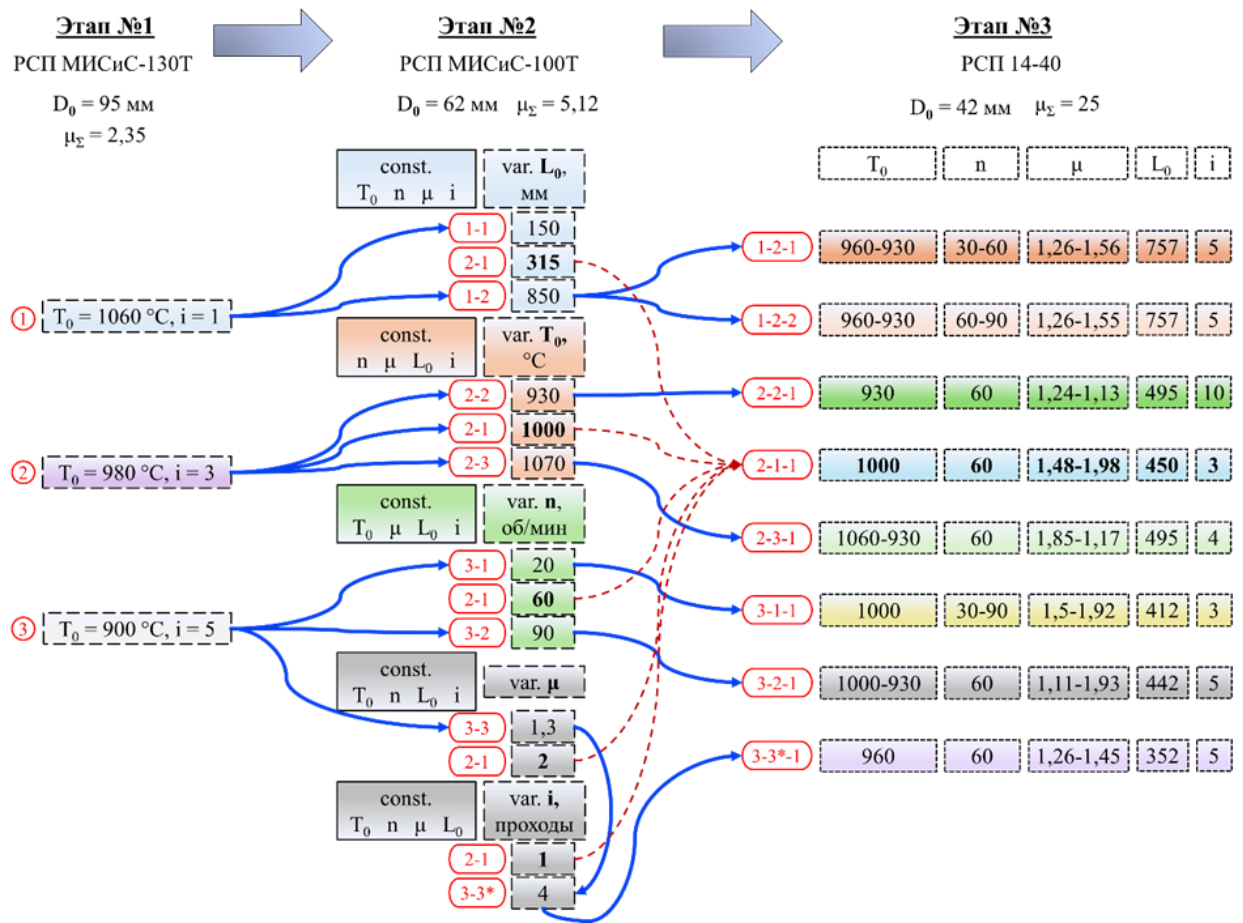


Рисунок 2.9 – Схема плана экспериментального исследования

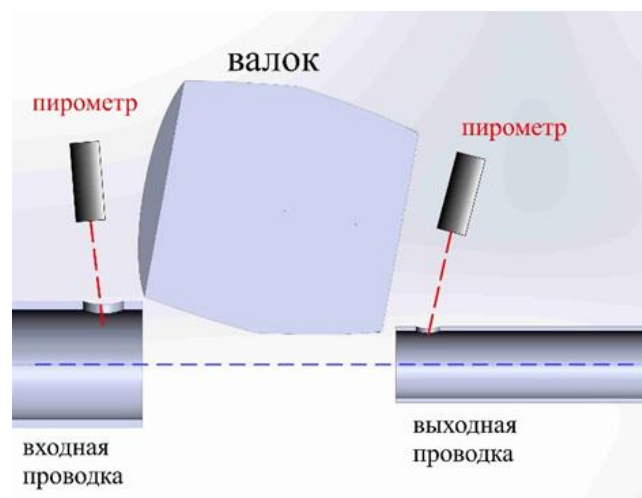


Рисунок 2.10 – Схема установки пирометров

На первом этапе прокатка проводилась при трёх различных температурах: 1060 °C, 980 °C и 900 °C, а также при разном количестве проходов: 1, 3 и 5, соответственно, при этом

суммарный коэффициент вытяжки оставался постоянным (таблица 2.7). Выбор температуры прокатки обусловлен фазовым составом сплава при данных температурах: режим № 1 соответствует однофазной β -области, режим № 2 – области $(\alpha+\beta)$ -фазы, а режим № 3 – ниже области начала Тпп. Количество проходов было определено на основании сопротивления деформации сплава: при более низких температурах из-за возрастания сопротивления число проходов увеличивалось при сохранении общего коэффициента вытяжки. Прутки, полученные на данном этапе охлаждались на воздухе.

Таблица 2.7 – Режимы прокатки 1-го этапа на стане МИСиС 130-Т

№ режима	T ₀ , °C	Диаметр заготовки/прутка, мм		Коэффициент вытяжки		Длина заготовки/прутка, мм	
		D ₀	D ₁	μ _i	μ _Σ	L ₀	L ₁
1 проход							
1	1060	95,0	61,0	2,4	2,4	430	1043
3 прохода							
2	980	95,0	80,0	1,4	1,4	420	592
		80,0	72,0	1,2	1,7	592	731
		72,0	61,4	1,4	2,4	731	1005
5 проходов							
3	900	95,0	87,7	1,2	1,2	420	493
		87,7	81,7	1,2	1,4	493	568
		81,7	74,4	1,2	1,6	568	685
		74,4	67,6	1,2	2,0	685	830
		67,6	61,2	1,2	2,4	830	1012

После первого этапа прокатки от деформированных прутков диаметром 61...62 мм были отрезаны утяжки и образцы с каждого конца. Затем были подготовлены заготовки для второго этапа прокатки.

На втором этапе для исследования влияния температуры прокатки были выбраны три уровня: 930 °C (ниже Тпп), 1000 °C ($\alpha+\beta$ -область) и 1070 °C (β -область). Температура 1000 °C принята основной для изучения влияния других параметров прокатки.

Выбор частоты вращения валков обусловлен техническими ограничениями оборудования: минимальная частота составляет 20 об/мин, максимальная – 90 об/мин. Средняя частота 60 об/мин выбрана в качестве базовой.

При анализе коэффициента вытяжки для однопроходной прокатки изучено общее изменение структурного состояния металла и влияние деформационного нагрева при различных температурных режимах и степенях обжатия. В качестве сравнительных режимов выбраны коэффициенты вытяжки 1,3 и 2,0. Дополнительно, после удаления утяжек и отбора образцов от прутка, прокатанного при коэффициенте вытяжки 1,3, была

проведена прокатка с тремя проходами до достижения суммарного коэффициента вытяжки 2,0 с целью изучения влияния количества проходов на формирование структуры прутков.

Длина исходной заготовки рассматривается как один из факторов, оказывающих заметное влияние на равномерность свойств прутка между передним и задним концами. Из прутка диаметром 61 мм и длиной 1005 мм после первого этапа прокатки были получены две заготовки длиной 850 мм и 150 мм с последующим сравнением результатов с базовым режимом прокатки заготовки длиной 315 мм. План второго этапа прокатки на стане МИСиС-100Т приведен в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Режимы прокатки 2-го этапа на стане МИСиС 100-Т

№ режима	Изучаемый параметр	i	T ₀ , °C	n, мин ⁻¹	D ₀ , мм	D ₁ , мм	μ	μΣ	L ₀ , мм	L ₁ , мм
2-1	Базовой режим	1	1000	60	61,0	42,0	2,1	2,1	315	662
2-2	T ₀	1	930	60	61,0	42,0	2,1	2,1	315	662
2-3		1	1070	60	61,0	42,0	2,1	2,1	315	662
3-1	n	1	1000	20	61,0	42,0	2,1	2,1	305	541
3-2		1	1000	90	61,0	42,0	2,1	2,1	305	541
3-3	μ	1	1000	60	61,0	53,6	1,3	1,3	305	397
3-3*	i _Σ	2	1000	60	53,6	50,2	1,1	1,4	334	367
		3	1000	60	50,2	44,7	1,3	1,9	367	478
		4	1000	60	44,7	42,0	1,1	2,1	478	525
1-2	L ₀	1	1000	60	61,0	42,0	2,1	2,1	850	1793
1-1		1	1000	60	61,0	42,0	2,1	2,1	150	316

С целью сохранения морфологию структурных составляющих прутков после прокатки и исключения влияния замедленного охлаждения на формирование их формирование структуры прутки немедленно после окончания прокатки подвергались охлаждению водой.

На третьем этапе эксперимента (таблица 2.9) реализовано несколько вариантов многопроходных режимов прокатки, отличающихся температурой начала и конца прокатки: постоянная во всех проходах, либо с началом прокатки в β-области и окончанием прокатки в α+β-области. Также рассмотрены режимы с различной скоростью прокатки и количеством проходов. Для конечных прутков диаметром 20 мм суммарный коэффициент вытяжки был одинаковым.

Таким образом, всего было реализовано 59 экспериментальных вариантов прокатки.

Таблица 2.9 – Режимы прокатки 3-го этапа на стане МИСиС 14-40

№ режима	i	T ₀ , °C	n, мин ⁻¹	D ₀ , мм	D ₁ , мм	μ	μΣ	L ₀ , мм	L ₁ , мм
2-3-1	1	1060	58,1	42,0	32,0	1,7	1,7	495,0	852,7
	2	930	57,9	32,0	23,5	1,9	3,2	852,7	1581,1
	3	930	57,9	23,5	19,8	1,4	4,5	1581,1	2227,3
	4	930	57,8	19,8	18,3	1,2	5,3	1113,6	1303,7
2-2-1	1	930	58,0	42,0	39,5	1,1	1,1	495,0	559,6
	2	930	55,3	39,5	36,2	1,2	1,4	559,6	666,3
	3	930	57,9	36,2	32,5	1,2	1,7	666,3	826,7
	4	930	57,8	32,5	30,2	1,2	1,9	826,7	957,4
	5	930	58,1	30,2	27,2	1,2	2,4	957,4	1180,2
	6	930	57,8	27,2	25,2	1,2	2,8	1180,2	1375,0
	7	930	57,9	25,2	23,2	1,2	3,3	1375,0	1622,3
	8	930	57,8	23,2	21,1	1,2	4,0	1622,3	1961,3
	9	930	57,4	21,1	19,3	1,2	4,7	980,6	1172,1
	10	930	57,8	19,3	18,3	1,1	5,3	1172,1	1303,7
2-1-1	1	1000	59,8	42,1	31,8	1,8	1,8	450,0	788,7
	2	1000	59,6	31,8	22,9	1,9	3,4	788,7	1520,9
	3	1000	59,7	22,9	18,8	1,5	5,0	1520,9	2256,6
3-1-1	1	1000	29,8	42,3	31,8	1,8	1,8	412,0	729,6
	2	1000	59,7	31,8	22,9	1,9	3,4	729,6	1402,4
	3	1000	87,6	22,9	18,7	1,5	5,1	1402,4	2103,1
3-2-1	1	1000	59,7	41,9	31,7	1,8	1,8	442,0	772,2
	2	1000	59,7	31,7	22,8	1,9	3,4	772,2	1492,7
	3	930	59,6	22,8	21,6	1,1	3,8	1492,7	1663,2
	4	930	59,6	21,6	19,7	1,2	4,5	1263,2	1518,6
	5	930	59,6	19,7	18,6	1,1	5,1	1518,6	1703,5
3-3*-1	1	960	59,5	42,0	37,4	1,3	1,3	352,0	444,5
	2	960	59,5	37,4	31,2	1,4	1,8	444,5	638,8
	3	960	59,5	31,2	26,0	1,4	2,6	638,8	919,8
	4	960	59,5	26,0	22,0	1,4	3,7	919,8	1284,7
	5	960	59,5	22,0	18,3	1,5	5,3	1284,7	1856,8
1-2-1	1	960	59,5	42,17	37,6	1,3	1,3	1514,0	1904,4
	2.1	960	59,5	37,6	31,6	1,4	1,8	952,2	1348,1
	3.1	930	29,9	31,6	27,1	1,4	2,4	1348,1	1833,0
	4.1	930	29,7	27,1	21,8	1,6	3,7	1353,0	2090,9
	5.1	930	29,8	21,8	19,0	1,3	4,9	1870,9	2462,9
1-2-2	1	960	59,5	42,17	37,6	1,3	1,3	1514,0	1904,4
	2.2	960	59,5	37,6	31,6	1,4	1,8	952,2	1348,1
	3.2	930	87,6	31,6	27,2	1,4	2,4	1348,1	1819,6
	4.2	930	87,6	27,2	21,8	1,6	3,7	1314,6	2046,5
	5.2	930	87,6	21,8	18,8	1,3	5,0	1826,5	2455,9

Для обеспечения равномерности распределения параметров выбранных режимов прокатки в области их исследования были построены графики на основе латинского гиперкуба в плоском представлении (рисунок 2.11).

Метод латинского гиперкуба (LHS) – это метод генерации выборок случайных величин из заданной функции распределения вероятностей $f_X(x)$ для создания

справедливого распределения входных переменных с целью уменьшения количества итераций во время моделирования [104]. Он был разработан в 1970-х годах и широко используется в моделировании экспериментов и численном интегрировании. В двумерной статистической выборке квадратная сетка, содержащая позиции выборки, называется латинским квадратом, если в каждой строке и каждом столбце находится только одна выборка. Латинский гиперкуб – это обобщение этого определения на многомерность, при котором только один гиперкуб содержит одну выборку в каждом осевом направлении или по каждой координатной оси [105].

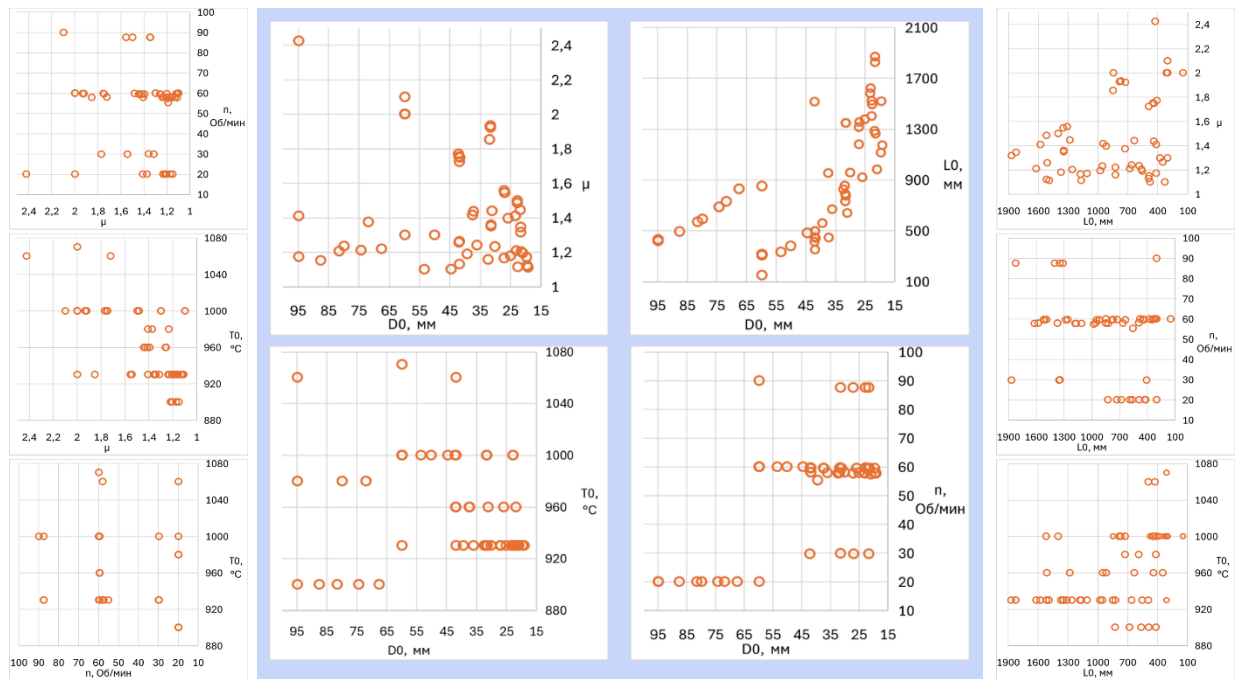


Рисунок 2.11– Распределение параметров режимов прокатки

Из рисунка можно видеть, что выбранные диапазоны основных режимов прокатки достаточно полно покрывают поле распределения, что говорит о их равномерности для всей области исследуемых параметров. Также на некоторых из графиков видна некая граница области распределения в пространстве параметров, называемая в некоторых источниках границей Парето. Граница Парето (фронт Парето) – это множество оптимальных решений в многокритериальных задачах, где улучшение одного параметра невозможно без ухудшения другого. Она показывает наилучший баланс между противоречивыми целями (например, цена/качество), представляя собой кривую, за пределами которой находятся недостижимые решения, а ниже – неэффективные [106].

Подобное ограничение можно наблюдать на графике распределения диаметров и длин, где четко выражена граница, показывающая естественный постепенный рост длины при уменьшении диаметров прокатываемой заготовки. Аналогичное ограничение

формируется на графике «температура-коэффициент вытяжки», который отражает рациональную границу допустимых обжатий прутка на каждом стане при определенной температуре (деформация в β -области или в $\alpha+\beta$ -области).

Обработка данных мониторинга процесса прокатки

В результате мониторинга процесса прокатки получены данные температуры на входе и выходе из ОД, значения токовой нагрузки привода валка и измерения геометрии прутков. На основе этих данных рассчитываются следующие величины:

- $T_{\text{ср.вх.}}$ и $T_{\text{ср.вых.}}$ – среднее значение измеренной температуры поверхности металла на входе и на выходе из ОД, соответственно.

- $\Delta T_{\text{вых.-вх.}}$ – разница между средними температурами на выходе и на входе в ОД:

$$\Delta T_{\text{вых.-вх.}} = T_{\text{ср.вых.}} - T_{\text{ср.вх.}} \quad (2.1)$$

- $\Delta T_{\text{вх.}}$ и $\Delta T_{\text{вых.}}$ – разница между температурами, измеренными на переднем и заднем концах прутка на входе и на выходе из ОД соответственно:

$$\Delta T_{\text{вх.}} = (T_{\text{п.к.}} - T_{\text{з.к.}}) \text{ на входе} \quad (2.2)$$

$$\Delta T_{\text{вых.}} = (T_{\text{п.к.}} - T_{\text{з.к.}}) \text{ на выходе} \quad (2.3)$$

- $\Delta T_{\text{п.}}$ – разница между температурами переднего конца прутка, измеренными на входе и на выходе из ОД, соответственно:

$$\Delta T_{\text{п.}} = (T_{\text{вх.}} - T_{\text{вых.}}) \text{ переднего конца} \quad (2.4)$$

- $\Delta T_{\text{з.}}$ – разница между температурами заднего конца прутка, измеренными на входе и на выходе из ОД, соответственно:

$$\Delta T_{\text{з.}} = (T_{\text{вх.}} - T_{\text{вых.}}) \text{ заднего конца} \quad (2.5)$$

Эти величины являются показателями изменения температуры заготовки/прутка в ходе процесса прокатки.

На каждом этапе экспериментальной прокатки проводился отбор образцов с переднего и заднего концов каждого полученного прутка (рисунок 2.13). Для переднего и заднего концов прутков конечного диаметра выполнено по 4 измерения диаметра, определены средние значения и овальность, которая рассчитывается по формуле (2.6):

$$a = \frac{2 \cdot (D_{max} - D_{min}) \cdot 100\%}{(D_{max} + D_{min})} \quad (2.6)$$

где D_{max} – максимальный диаметр прутка;

D_{min} – минимальный диаметр прутка.

Перед анализом макро- и микроструктуры была произведена шлифовка и полировка образцов, затем проведено травление раствором ($1\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O}$). Определение балльности макроструктуры было проведено на основе ГОСТ 26492–85 [107], путем визуального сравнения полученной макроструктуры с 10-балльной шкалой.

Анализ микроструктуры переднего и заднего концов прутка был произведен с использованием методов оптической микроскопии (Carl Zeiss Axio Lab.A1) в трех зонах (поверхность, середина радиуса и центр). Количественный анализ толщины α -пластин и объемной доли α -фазы был выполнен при помощи программного обеспечения ImageJ.

Анализ скоростных параметров

Для анализа скоростных параметров проведен расчет коэффициентов осевой и тангенциальной скорости на основе расчетно-экспериментальной методики.

Коэффициент осевой скорости η_0 определяется как отношение фактической осевой скорости и теоретической (расчетной) осевой скорости прутка (2.7):

$$\eta_0 = \frac{v_{\text{то}}}{v_{\text{фо}}}, \quad (2.7)$$

где $v_{\text{фо}}$ – фактическая осевая скорость прутка, мм/с;

$v_{\text{то}}$ – теоретическая осевая скорость прутка без учета скольжения, мм/с.

Однако экспериментальное определение осевой скорости заготовки в процессе РСП затруднительно, поэтому коэффициент осевой скорости может быть рассчитан на основе экспериментально зафиксированного (фактического) времени прокатки $\tau_{\text{ф}}$, которое определялось по графикам токовой нагрузки на главный привод стана. Тогда η_0 может быть определен из соотношения (2.8):

$$\eta_0 = \frac{\tau_{\text{т}}}{\tau_{\text{ф}}}, \quad (2.8)$$

где $\tau_{\text{т}}$ – теоретическое машинное время прокатки, которое с достаточной точностью может быть определено из соотношения (2.9):

$$\tau_T = \frac{L_{o.d.} + L_1}{v_{To}}, \quad (2.9)$$

где $L_{o.d.}$ – длина очага деформации, мм;

L_1 – длина прутка после прокатки, мм.

Далее для определения коэффициента тангенциальной скорости было произведено измерение шага винтовой линии на поверхности прутка S_1 на прокатанных прутках. Данный параметр может быть рассчитан по формуле (2.10) [11]:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_{\pi}}{k} \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot \frac{\eta_o}{\eta_{\tau}}, \quad (2.10)$$

где d_{π} – диаметр прутка после прокатки, мм;

$k = 3$ – количество валков;

β – угол подачи, градусы.

Отсюда, зная коэффициент осевой скорости и шаг подачи (винтовой линии на поверхности прутка), можно рассчитать коэффициент тангенциальной скорости по формуле (2.11):

$$\eta_{\tau} = \frac{\pi \cdot d_{\pi}}{k \cdot S_1} \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot \eta_o. \quad (2.11)$$

Выводы по главе 2

1. Разработана система мониторинга на основе программной среды SCADA, которая обеспечивает получение экспериментальных данных о температуре поверхности заготовки на входе и на выходе из ОД, частоте вращения валков, времени прокатки и изменении тока электродвигателей главного привода в процессе прокатки.

2. Выполнена экспериментальная тарировка используемых ИК-пирометров и определены коэффициенты излучения образцов из титановых сплавов BT3-1 и BT6 в диапазоне температур 900...1200 °С.

3. Разработан план экспериментальных исследований, включающий 59 режимов прокатки. По методу латинского гиперкуба выявлено, что выбранные значения параметров для всех режимов прокатки достаточно полно покрывают поле распределения, что говорит о их равномерности для всей области исследуемых режимов.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РСП ТИТАНОВОГО СПЛАВА

3.1 Определение диапазона температуры полиморфного превращения

Определение диапазона температуры полиморфного превращения ($T_{ПП}$) было выполнено с использованием dilatометрического анализа. Образец цилиндрической формы диаметром 4 мм и длиной 10 мм нагревали со скоростью 10 °С/мин до температуры 1100 °С. Диапазон $T_{ПП}$ определялся по изменениям скорости линейного расширения образца в процессе нагрева. Результаты изменения длины образца при нагреве представлены на рисунке 3.1.

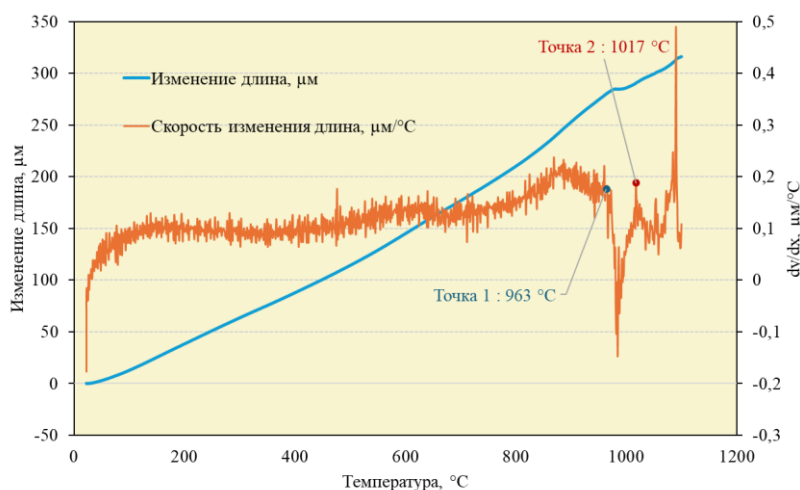


Рисунок 3.1 – Изменение длины и скорость изменения длины образца при нагреве до температуры 1100 °С

В процессе нагрева наблюдалось скачкообразное изменение скорости удлинения образца при достижении температуры 963 °С (обозначено как «Точка 1» на рисунке 3.1), что соответствует началу полиморфного превращения. Этот процесс продолжался до температуры 1017 °С (обозначенной как «Точка 2» на рисунке 3.1). В полученном диапазоне температур (963...1017 °С) микроструктура образца находится в двухфазной области $\alpha+\beta$, при температурах выше диапазона – в однофазной β -области, а ниже – в однофазной α -области. На основании полученных данных определяется температура нагрева для прокатки в соответствии с фазовым состоянием сплава.

3.2 Экспериментальная прокатка

В данном разделе на основе данных, полученных с помощью системы мониторинга процесса прокатки проведён анализ температурного поля заготовки/прутка. Также на

основании металлографического анализа определено структурное состояние переднего и заднего концов полученных прутков.

3.2.1 Первый этап: прокатка на стане МИСиС-130Т

Анализ температурного поля в процессе РСП

В результате мониторинга процесса прокатки получены данные о температуре поверхности на входе и выходе рабочих валков, а также значения токовой нагрузки привода каждого из валков. На рисунке 3.2 представлен пример графиков изменения температуры и тока в ходе прокатки по режиму № 1 ($T_0 = 1060\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 1$).

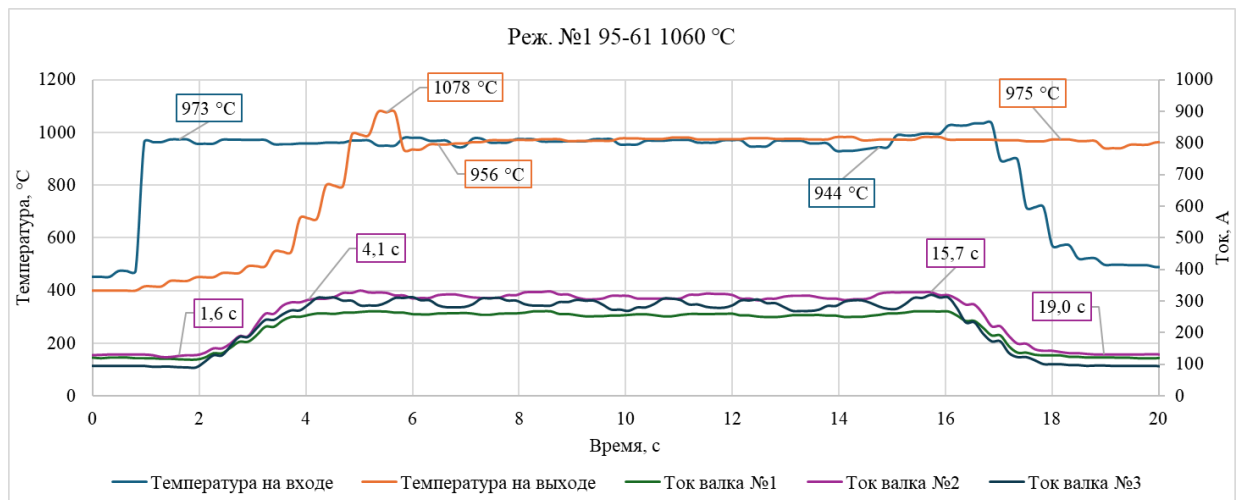


Рисунок 3.2 – Изменение температуры прутка на входе и на выходе из валков и токовой нагрузки на привод каждого валка в ходе прокатки

После нагрева заготовка транспортируется к входной стороне клетки стана МИСиС-130Т. В момент, когда передний конец заготовки достигает зоны измерения пирометра на входе валков, фиксируется температура переднего конца (973 °C). Толкатель перемещает заготовку в валки, и начинается процесс прокатки со стадии захвата (~1,6...2,0 с). По окончании стадии захвата начинается стадия установившегося процесса прокатки. Затем передний конец деформируемого прутка выходит из валков и достигает зоны измерения пирометра на выходе из очага деформации. Угол наклона пирометра позволяет измерять температуру переднего торца прутка, что отображено на графике резким повышением температуры выхода до 1078 °C, с последующим снижением до 956 °C, где начинается измерение поверхности прутка на выходе и фиксируется температура переднего конца.

Процесс прокатки и мониторинга продолжается стабильно до приближения заднего конца заготовки к точке измерения пирометра на входе в ОД, где температура заднего конца (944 °C) фиксируется на 15,7 с, что характеризует окончание стадии установившегося режима. На выходе из валков температура заднего конца также измеряется и фиксируется

(975 °С). После выхода хвоста заднего конца из зоны деформации процесс прокатки заканчивается на ~18...19 с.

В таблице 3.1 представлены итоговые данные мониторинга процесса прокатки во всех исследуемых режимах на стане МИСиС-130Т. Можно видеть, что температура поверхности во всех случаях значительно ниже, чем исходная температура нагрева под прокатку, что связано с естественным охлаждением поверхности металла в процессе транспортировки от печи до стана и теплоотдачей при контакте с холодными (~25 °С) валками.

Таблица 3.1 – Результаты данных мониторинга РСП на стане МИСиС-130Т (Этап №1)

№ режима	i	Температура на входе, °С			Температура на выходе, °С			τ , с	$\Delta T_{\text{вых.-вх.}}$, °С
		$T_{\text{п.к.}}$	$T_{\text{з.к.}}$	$T_{\text{ср.вх.}}$	$T_{\text{п.к.}}$	$T_{\text{з.к.}}$	$T_{\text{ср.вых.}}$		
1	1	973	944	962,0	956	975	973,9	17,3	11,9
2	1	888	872	900,6	895	898	906,3	11,4	5,7
	2	897	862	902,4	867	887	876,7	11,7	-25,7
	3	863	915	896,6	890	896	892,0	15,4	-4,6
3	1	859	848	857,9	879	851	865,4	9,3	7,5
	2	829	819	828,7	838	838	838,3	9,8	9,6
	3	844	820	834,7	825	839	841,2	11,3	6,5
	4	852	831	843,8	851	849	848,7	12,8	4,9
	5	858	824	839,0	848	849	853,9	15,6	14,9

Для температуры нагрева заготовки 1060 °С снижение температуры ее поверхности в среднем составляет 100 °С (рисунок 3.2), а для температуры нагрева 960 и 900 °С – около 60 °С. Также можно отметить, что на входе колебания температуры более значительны, чем на выходе из валков, что вероятно связано с наличием слоя окалины на исходных заготовках после нагрева.

Для прокатки в один проход при 1060 °С (режим № 1) и последнего прохода при прокатке за 5 проходов при 900 °С (режим № 3) температура выхода несколько выше, чем температура входа. Для последнего прохода при 980 °С (режим № 2), наоборот, температура поверхности на выходе из очага деформации ниже, чем на входе. В данном случае влияние может оказывать не только величина деформационного разогрева при различных температурах нагрева заготовок, но и величина обжатия за проход и длина очага деформации (т.е. суммарное время контакта каждой точки заготовки с валками) [108]. Поэтому для дальнейшего анализа построены графики средней температуры поверхности на входе и выходе из валков для каждого прохода (рисунок 3.3). Также на графиках отражены значения коэффициента вытяжки (зеленые точки, соединенные пунктирной линией) для каждого прохода и диапазон $T_{\text{пп}}$ (светло-голубая область) [108]. На диаграммах можно проследить явную зависимость повышения средней температуры

поверхности на выходе из валков с увеличением коэффициента вытяжки. Также видно, что понижение температуры нагрева существенно повышает величину деформационного разогрева. Так при температуре 1060 °С и коэффициенте вытяжки 2,4 средняя температура на выходе на 12 °С выше, чем на входе (рисунок 3.3, а), в то время как при температуре нагрева 900 °С аналогичное по величине повышение температуры поверхности наблюдается при коэффициентах вытяжки 1,2 (рисунок 3.3, в). Полученные данные показывают, что изменение температуры прутка из сплава ВТЗ-1 в процессе РСП существенно зависит от коэффициента вытяжки даже при незначительном его изменении, а также определяется температурой нагрева под прокатку, что должно отразиться на формировании макро- и микроструктуры [108].

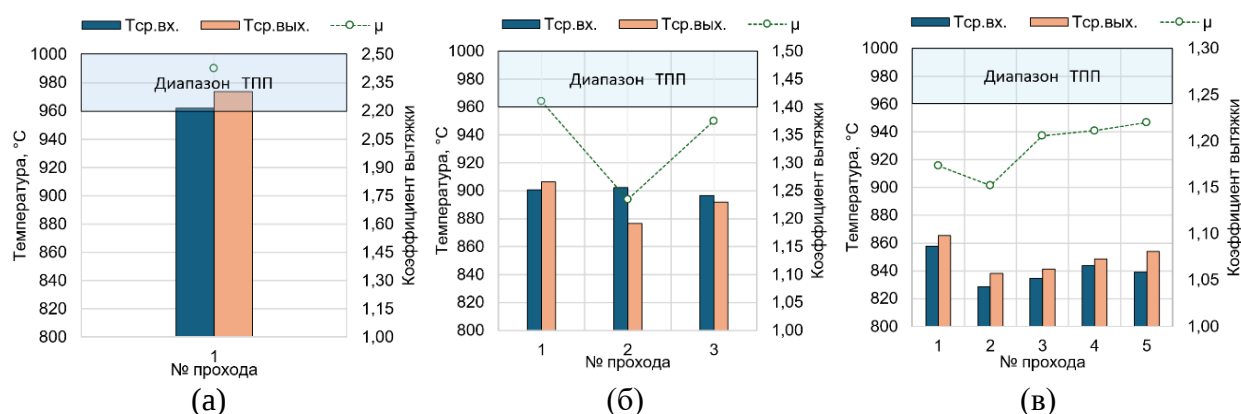


Рисунок 3.3 – Средняя температура поверхности прутка из ВТЗ-1 в процессе РСП и коэффициент вытяжки по проходам: 1060 °С (а); 980 °С (б); 900 °С (в)

Анализ макроструктуры

Макроструктура исходной заготовки по сечению равномерная и в соответствии 10-балльной шкале макроструктуры по ГОСТ 2692–85 имеет 5 балл (рисунок 3.4, а).

Макроструктура прутка после РСП при температуре выше $T_{ПП}$ (1060 °С) имеет различия как по поперечному сечению, так и между передним и задним концом (рисунок 3.4, б). Наименьший балл макроструктуры наблюдается на поверхности прутка, а наибольший в осевой области. Для переднего конца от поверхности до расстояния 0,74R (~8 мм) формируется 4 балл, далее до 0,35R наблюдается 5 балл, и оставшаяся центральная область имеет 6 балл. Для заднего конца можно выделить уже 4 области с различным баллом структуры. Тонкий поверхностный слой имеет 3 балл, до 0,58R от поверхности наблюдается 4 балл. На расстоянии от 0,58R до 0,35R сформирован 5 балл, и оставшаяся часть осевой зоны имеет 6 балл [108].

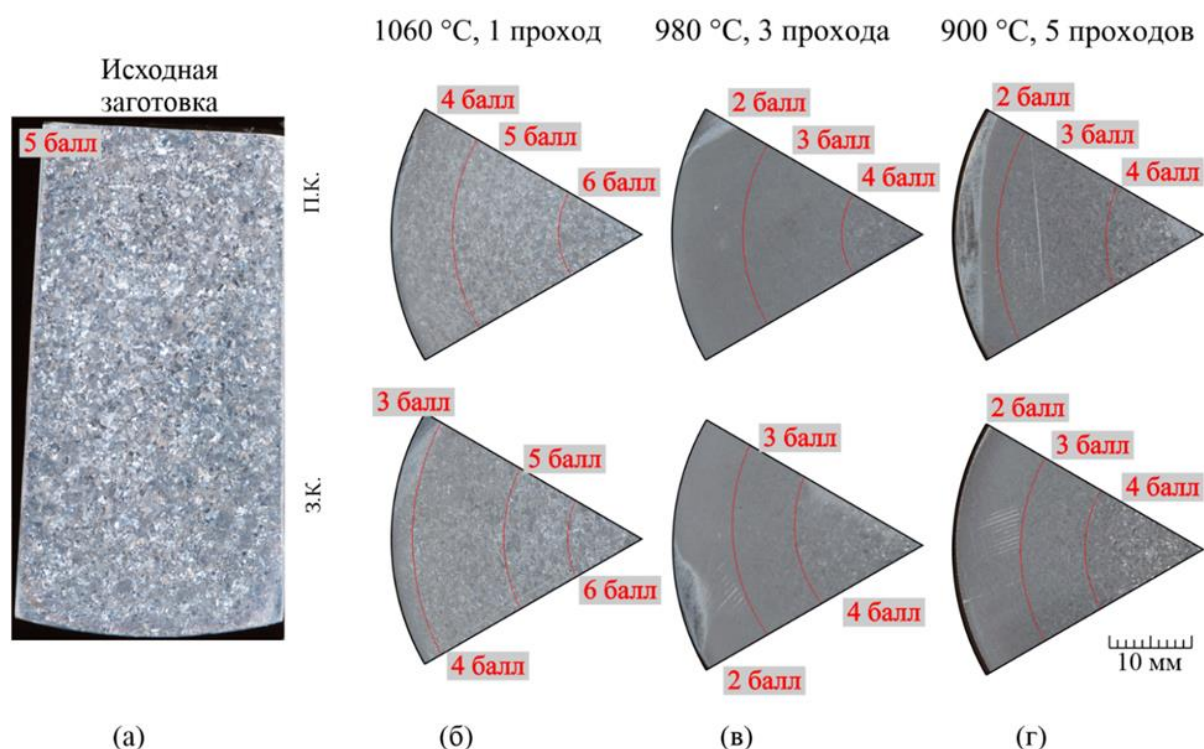


Рисунок 3.4 – Макроструктура исходной заготовки (а) и прутков после РСП (б-г) при различных температурах [108]

Полученные данные отражают градиентное увеличение температуры прутка от поверхности к центру, а также некоторое понижение температуры поверхности прутка по направлению к заднему концу. Данное снижение наблюдается и на графиках измерения температуры поверхности прутка с помощью инфракрасного пирометра на входе (рисунок 3.2). На выходе, напротив, видно некоторое увеличение температуры заднего конца, которое, однако, связано с пост-деформационным ростом температуры поверхности за счет внутреннего теплообмена металла [108].

При нагреве и прокатке прутков в двухфазной $\alpha+\beta$ -области (980 °C) макроструктура переднего и заднего концов представлена тремя зонами с баллом от 2 у поверхности до 4 в осевой зоне (рисунок 3.4, в).

При нагреве и РСП при температуре 900 °C, соответствующей однофазной α -области, в макроструктуре также можно условно выделить три области, соответствующие 2 баллам вблизи поверхности (до 0,78R), 3 баллам на середине радиуса (0,28R) и 4 баллам в осевой зоне (рисунок 3.4, г). При этом для заднего конца отмечается чуть большая площадь осевая область, соответствующая максимальному баллу зерна.

Анализ макроструктуры по сечению прутков показывает, что в данном случае суммарный коэффициент вытяжки 2,4 недостаточен для полной проработки структуры исходной заготовки. Кроме того, осевая зона имеет максимальную температуру, которая

увеличивается в процессе деформации и приводит к формированию макроструктуры с баллом от 4 до 6 [108].

Анализ микроструктуры

Микроструктура исходной заготовки (рисунок 3.5) крупнозернистая со средним размером β -зерен ~ 150 мкм, равноосная, пластинчатого типа. По границам β -зерен наблюдаются α -оторочка средней толщиной около 2,5 мкм. Кристаллы α -фазы внутри зерен представлены колониями игольчатой формы различной ориентировки, сформированными при полиморфном $\beta \rightarrow \alpha$ превращении. Толщина α -пластин составляет от 0,4 до 1,2 мкм.

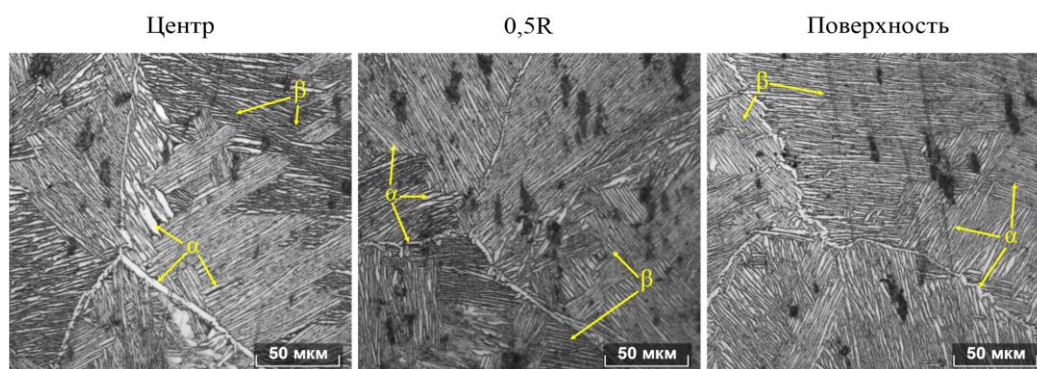


Рисунок 3.5 – Микроструктура исходной заготовки из сплава ВТ3-1 [108]

После РСП в один проход при температуре выше $T_{пп}$ (1060 °С) можно отметить некоторые различия в микроструктуре по поперечному сечению прутка (рисунок 3.6) [108]. Вблизи поверхности и на расстоянии середины радиуса формируется структура «корзиночного плетения», характерная для нагрева металла в β -области и окончания деформации в $\alpha + \beta$ -области. Зернограничная α -фаза имеет либо сильно искаженную деформированную форму (для переднего конца), либо более правильную форму, но незначительную толщину ($\sim 0,7 \dots 0,8$ мкм) для заднего конца. В центре прутка структура меняется на грубую игольчатую, α -оторочка имеет правильную форму и большую толщину, что говорит о ее формировании при полиморфном превращении с более высокой температуры β -области и более медленной скорости охлаждения [108].

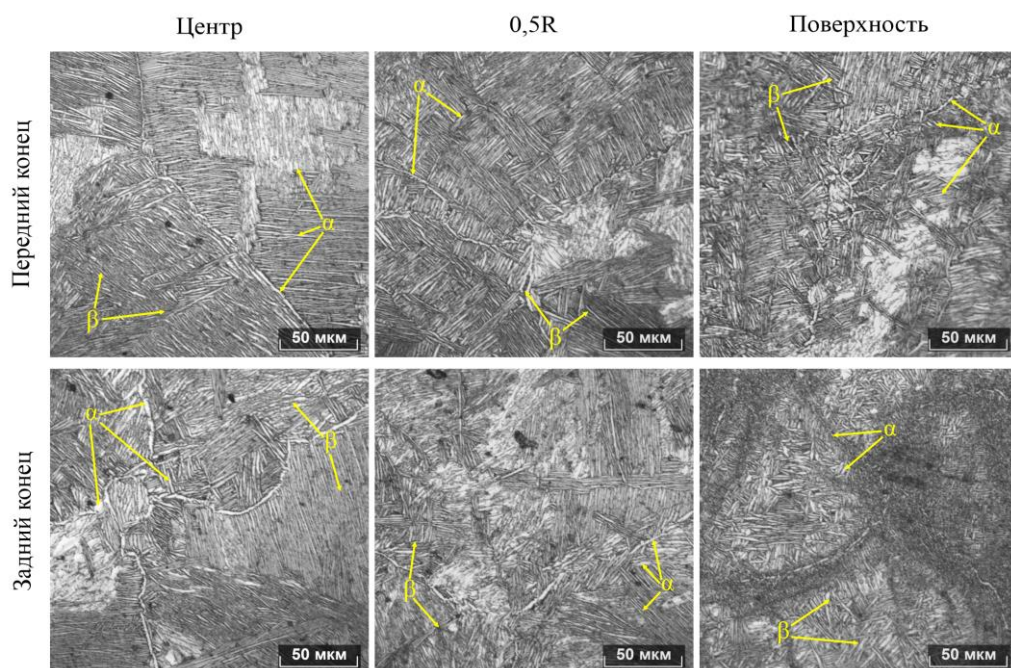


Рисунок 3.6 – Микроструктура прутка из сплава ВТЗ-1 после РСП (1060 °С, 1 проход) [108]

При нагреве и прокатке прутков в двухфазной $\alpha+\beta$ -области (980 °С) за три прохода наблюдаются различия в изменении структурных составляющих в сравнении с прокаткой в β -области (рисунок 3.7) [108]. Микроструктура имеет схожее строение для переднего и заднего концов, но существенные различия по поперечному сечению. Вблизи поверхности после прокатки и охлаждения на воздухе наблюдаются червячнообразные искаженные кристаллы α -фазы и еще более мелкие частицы α -фазы в пространствах между ними, морфология которых близка к глобулярной, границы β -зерен не наблюдаются. Данный тип структур характерен для деформации в $\alpha+\beta$ -области. По направлению к центру искажение формы α -фазы уменьшается, а средняя толщина α -пластин возрастает от 1,8 мкм для поверхности до 2,5 мкм для середины радиуса и 3,1 мкм для центральной части. При этом начиная от середины радиуса к центру можно видеть отдельные границы зерен с α -оторочкой. Подобные структуры характерны для деформации вблизи температуры полиморфного превращения или деформации начала в β -области и окончании в $\alpha+\beta$ -области. Таким образом, можно предположить, что деформационный разогрев в осевой зоне прутка может достигать 50...100 °С [108].

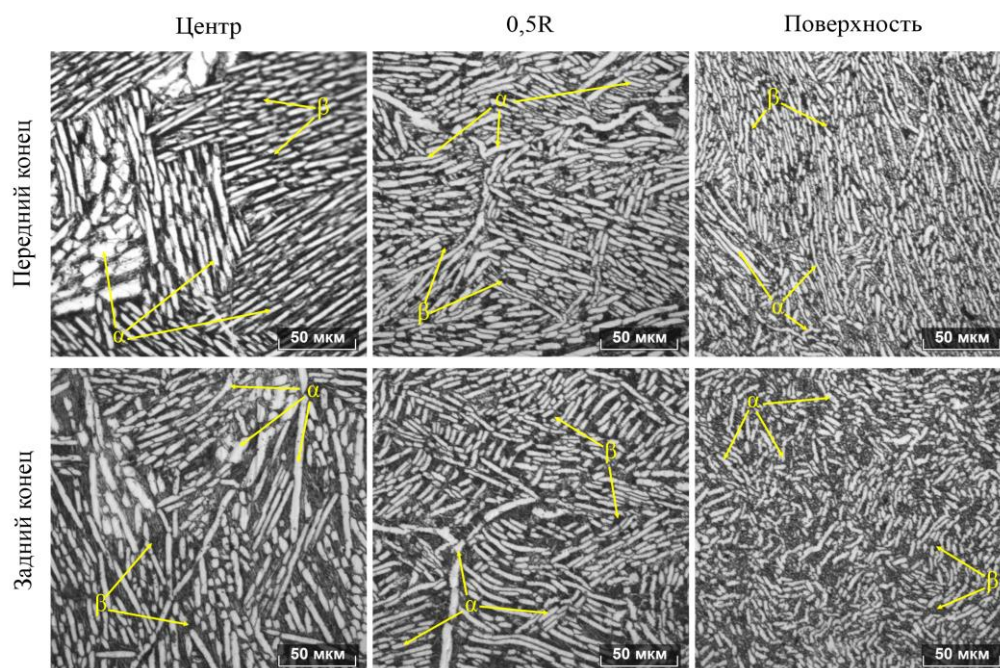


Рисунок 3.7 – Микроструктура прутка из сплава ВТ3-1 после РСП (980 °С, 3 прохода) [108]

Микроструктура поверхности прутка, полученная после нагрева до 900 °С и РСП за 5 проходов, имеет схожее строение для переднего и заднего концов (рисунок 3.8) [108]. Вблизи поверхности наблюдается сильно искаженные кристаллы α -фазы со средней толщиной 1,2 мкм (равноосная переходного типа). Для середины радиуса прутка искажение α -пластин уменьшается и появляются границы крупных β -зерен.

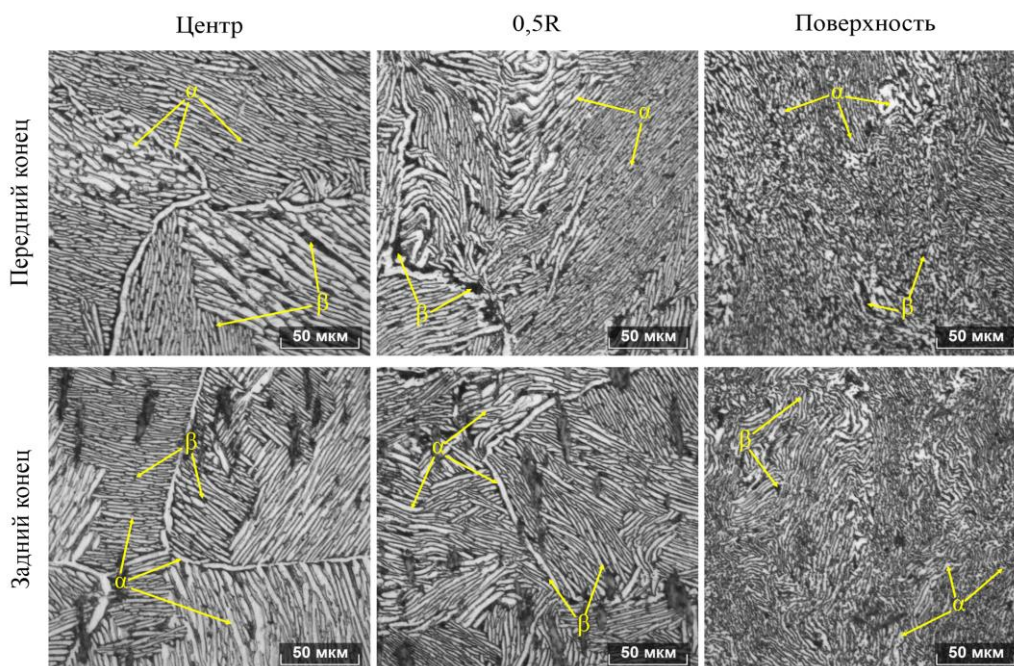


Рисунок 3.8 – Микроструктура прутка из сплава ВТ3-1 после РСП (900 °С, 5 проходов) [108]

В осевой зоне микроструктура состоит из β -зерен с выделениями α -фазы по границам и колоний игольчатой α -фазы с различной разориентированностью пластин [108].

Данные количественного анализа структурных составляющих отображены на рисунке 3.9 [109]. Для прутков, полученных по режимам № 2 и 3, наблюдается уменьшение толщины пластин α -фазы от 2,7 и 1,6 мкм на оси, 1,9 и 1,4 мкм на середине радиуса до 1,4 и 1,0 мкм вблизи поверхности, соответственно. Более тонкие и деформированные пластины α -фазы наблюдаются для третьего режима в зоне у поверхности, где деформация протекала при самой низкой температуре. У прутка, полученного по режиму № 1, наблюдается незначительный рост размеров данной структурной единицы от центра к поверхности, что можно связать с падением температуры поверхности прутка ниже β -области. В исходной заготовке объемная доля α -фазы (42...46 %) и толщина α -пластин (0,74...0,84 мкм) не имеют значительных отличий во всем сечении, что характерно для наблюдаемой однородной структуры. Такая же объемная доля α -фазы в области от оси до середины радиуса сохраняется в результате РСП за 1 проход, что также соответствует температурной области β -области. У поверхности доля объема, занимаемого α -фазой, возрастает до 59,4 %. В прутках, прокатанных за 3 и 5 проходов, напротив, наблюдается снижение объемной доли α -фазы от центра (57...67 %) к поверхности (53...55 %) [109]. Таким образом, понижение температуры РСП ниже β -области приводит к увеличению толщины α -пластин, их искажению и фрагментации, а также некоторому увеличению объемной доли α -фазы.

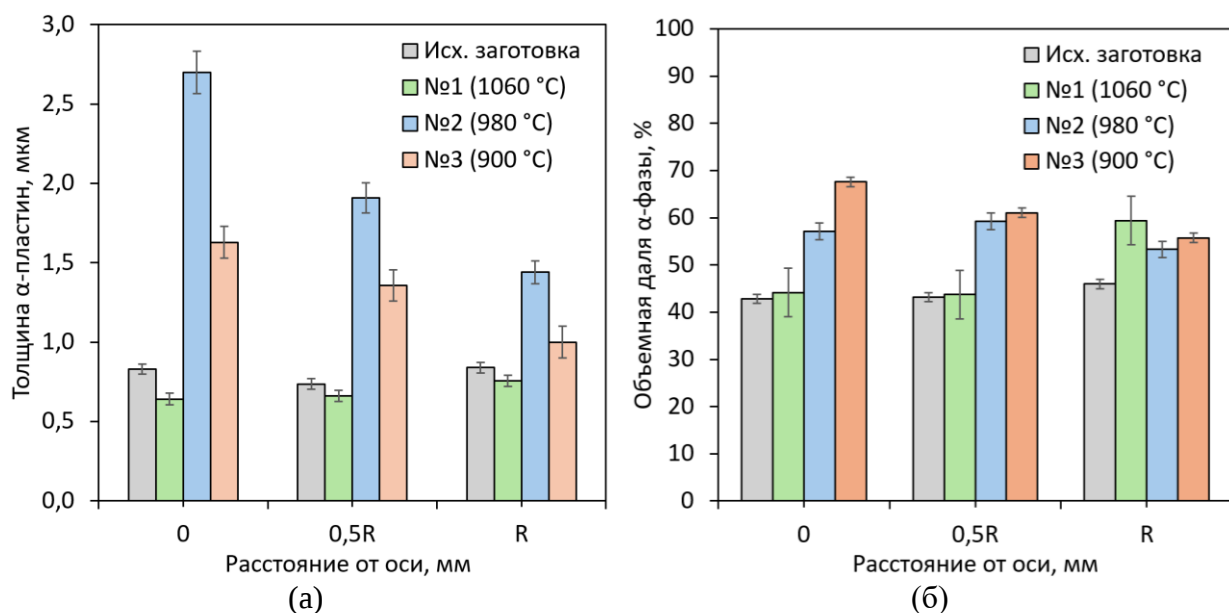


Рисунок 3.9 – Средняя толщина α -пластин (а) и объемная доля α -фазы (б) [109]

Проведенный анализ макро- и микроструктур прутков из сплава ВТЗ-1, полученных при разных температурах деформации и количестве проходов (т.е. разных коэффициентах

вытяжки за проход) показывает, что существуют значительные различия для условий формирования макро- и микроструктуры как по поперечному сечению, так и по длине прутка. В частности, отличия между передним и задним концом сокращаются при увеличении количества проходов и, соответственно, уменьшения длины промежуточных подкатов. Дополнительно, этому способствуют промежуточные подогревы между проходами, которые приводят к выравниванию температуры. С понижением температуры обработки в структуре растет доля занимаемой площади с меньшим баллом зерна макроструктуры (кроме переднего конца прутка, полученного при 900 °С). Наиболее равномерное распределение структуры по сечению и длине наблюдается для прутка, полученного при температуре нагрева 980 °С [108, 109].

В данном эксперименте суммарный коэффициент вытяжки и длина прутков являются недостаточными для выявления существенных изменений. При прокатке в один проход и высокой температуре деформации осевая зона прутка практически не изменяется и имеет макроструктуру балла 5...6 с долей занимаемой площади 30...55 %. Основные изменения микроструктуры в процессе РСП происходят вблизи поверхности, на расстоянии до $0,7R$. Однако, можно видеть, что структура полученных прутков вполне закономерно отличается в зависимости от температуры нагрева перед деформацией и формирующегося неравномерного теплового поля прутка в очаге деформации. Анализ изменения температуры показал, что только для нагрева в β -области температура поверхности прутков достигает области $T_{пп}$, а для прокатки в 3 и 5 проходов находится ниже. Однако, стоит иметь в виду, что полученные данные отражают только температуру поверхностного слоя, который может составлять несколько миллиметров. В действительности, полученные картины макро- и микроструктур осевой зоны прутков показали, что температура в процессе деформации там значительно выше. Дополнительно это подтверждается сравнением коэффициента вытяжки за проход и соответствующей величиной разницы между температурой входа и выхода прутка из очага деформации.

3.2.2 Второй этап: прокатка на стане МИСиС-100Т

В отличие от первого этапа, на данном этапе с целью упрощения представления результатов прокатки первоначально приведено описание результатов базового режима (режим № 2-1 в таблице 3.2). Далее представлено описание и обсуждение результатов прокатки, выполненных отдельно для каждого исследуемого параметра. Для каждого параметра представлены результаты измерений температуры прутка на входе и выходе из валков, а также проведён анализ микроструктуры и макроструктуры переднего и заднего концов полученных прутков.

Результаты мониторинга процесса РСП получены в таком же виде, как и на первом этапе (см. рисунок 3.2). Результаты анализа температурного поля поверхности заготовок/прутков в ходе второго этапа прокатки, предоставленные в таблице 3.2. Снимки макро- и микроструктуры образцов с переднего и заднего концов прутков, полученных на втором этапе прокатки, представлены в **приложении А**.

Вследствие отсутствия экспериментальных данных определение температуры заднего конца заготовок в режимах № 1-1 и 1-2 проводилось на основе ранее измеренных скоростей охлаждения образцов, а время было определено на основе расчета осевой скорости заготовки и ее длины.

Таблица 3.2 – Результаты данных мониторинга РСП на стане МИСиС-100Т (этап №2)

№ режима	i	Т вход, °С			Т выход, °С			τ , с	$\Delta T_{\text{вых.}-\text{вх.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{вых.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{вх.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{п.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{з.}}, ^\circ\text{C}$
		$T_{\text{п.к.}}$	$T_{\text{з.к.}}$	$T_{\text{ср.вх.}}$	$T_{\text{п.к.}}$	$T_{\text{з.к.}}$	$T_{\text{ср.вых.}}$						
2-2	1	861	869	884,4	962	964	961,3	3,30	76,9	-2	-8	-101	-95
2-1	1	968	917	949,1	1029	986	999,1	3,22	50,0	43	51	-61	-69
2-3	1	1010	961	999,8	1007	1012	1012,6	3,14	12,8	-5	49	3	-51
3-1	1	975	902	953	949	950	945,4	8,21	-7,6	-1	73	26	-48
3-2	1	970	944	960	1029	1022	1023,6	2,59	63,6	7	26	-59	-78
3-3	1	977	949	963,8	1029	945	945,3	1,95	-18,5	84	28	-52	4
3-3*	2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	3	897	888	897,4	913	919	918,2	2,33	20,8	-6	9	-16	-31
	4	878	862	879,2	915	887	897,3	2,41	18,1	28	16	-37	-25
1-2	1	955	934**	944,5	1029	992	1004,6	7,11	60,1	37	21	-74	-58
1-1	1	934	931**	932,5	998	988	993,0	-	60,5	10	3	-64	-57

** Значения получены расчетным путем.

Базовый режим прокатки (режим № 2-1)

Макроструктура переднего и заднего концов прутка, деформированного по базовому режиму прокатки, представлена на рисунке А.1, а. На переднем конце прутка сформированы три зоны с различной балльностью: 4 балл в центре до 0,49R, затем 3 балл до 0,72 R, и 2 балл у поверхности. На заднем конце балльность зерна в центре прутка также соответствует 4 баллу (0,65R), далее наблюдается промежуточный слой с 3 баллом до 0,72R, затем слой со 2 баллом зерна (0,74R) и приповерхностный слой с 1 баллом зерна.

Микроструктура представлена зернами из β -матрицы с внутризеренными колониями пластинчатой α -фазы (рисунок А.1, б). Как на переднем, так и на заднем конце наблюдается формирование глобулярной α -фазы. Также в структуре заднего конца присутствуют крупные пластины α -фазы с различной локальной ориентацией. Наибольшее их количество наблюдается в центре. В осевой зоне обоих концов присутствуют остаточные α -оторочки исходных β -зерен.

Далее приведено обсуждение результатов данного этапа прокатки для каждого исследуемого параметра.

Температура прокатки (T_0)

В результате анализа температуры поверхности заготовки на входе в ОД и прутка на выходе из валков установлено, что средняя температура поверхности на выходе выше, чем средняя температура на входе, причем этот дополнительный разогрев тем значительнее, чем ниже температура нагрева заготовки (рисунок 3.10, а). С повышением температуры прокатки разница между средними значениями температуры на входе и выходе уменьшается с 77 °С для $T_0 = 930$ °С до практически 13 °С для $T_0 = 1070$ °С.

На рисунке 3.10, б показана разница между температурами, измеренными на переднем и заднем концах прутка на входе и на выходе из ОД, соответственно. При наименьшей температуре прокатки 930 °С, наблюдается небольшая разница между температурой переднего и заднего концов прутка на входе, а также на выходе из ОД. При этом в случае нагрева до 1070 °С температура по длине заготовки на входе в ОД неравномерна, однако на выходе из ОД значения данного параметра для концов прутка практически не различаются. В случае прокатки при 1000 °С разница между температурами переднего и заднего концов прутка сохраняется на уровне 40...50 °С до и после прокатки. Это может быть объяснено двумя причинами: 1) скорость охлаждения металла снижается с понижением исходной температуры; 2) при прокатке в разных фазовых областях титанового сплава ВТЗ-1 существенный эффект оказывают изменяющиеся теплофизические свойства, которые приводят к разному распределению температуры по длине, что должно учитываться.

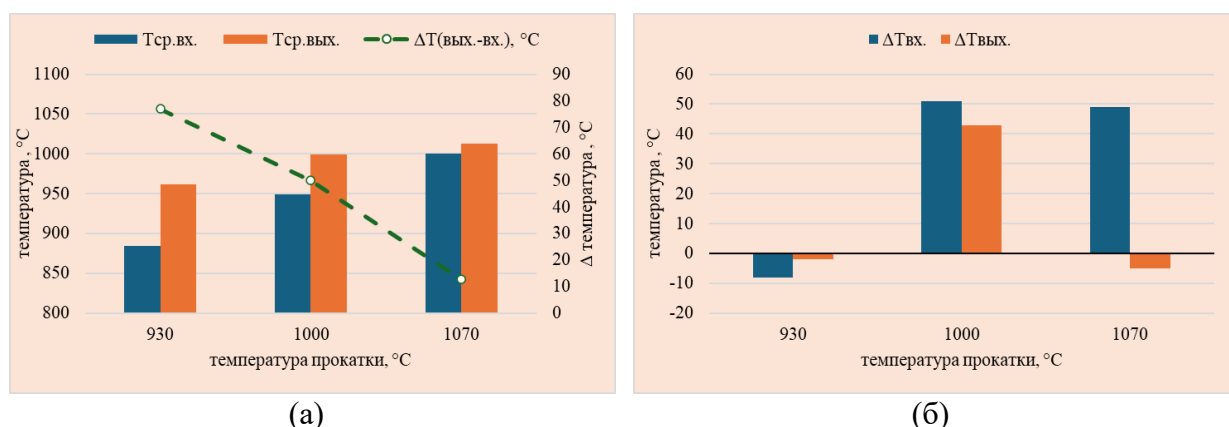


Рисунок 3.10 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), при изменении температуры прокатки

Результаты макроструктурного анализа, проведённого на переднем и заднем концах прутка, деформированного при температуре прокатки 930 °С представлена на

рисунке А.2, а, при $T_0 = 1070\text{ }^{\circ}\text{C}$ на рисунке А.3, а. При наименьшей температуре прокатки на обоих концах прутка получена макроструктура с распределением балльности от наибольшей в центральной зоне (3 балла) до наименьшей вблизи поверхности (1 балл), между ними наблюдается слой со структурой, соответствующей 2 баллу зерна (рисунок А.2, а). Толщина слоя с наименьшим баллом зерна на заднем конце прутка ($1R...0,73R$) приблизительно вдвое превышает толщину слоя с таким же баллом на переднем конце прутка ($1R...0,85R$). Также на заднем конце граница области с 3 баллом зерна находится ближе к оси прутка ($0,52R$), чем на переднем ($0,66R$). Это объясняется тем, что время нахождения переднего конца после выхода из ОД на воздухе оказалось достаточным для увеличения зоны макроструктуры в центре с баллом зерна 3. Этот эффект отсутствует для заднего конца, т. к. после окончания прокатки прутки сразу охлаждаются в воде.

На основе данных из таблицы 3.2 можно заметить, что режим прокатки № 2-1 имеет одинаковый уровень влияния для обоих концов прутка, так как $\Delta T_{\text{пл.}}$ и $\Delta T_{\text{з.}}$ относительно близки по значению, так же как $\Delta T_{\text{вх.}}$ и $\Delta T_{\text{вых.}}$. Однако на рисунке А.1, а наблюдается значительная разница в распределении балльности зерен между передним и задним концами, включая осевую зону. Это объясняется тем, что температура переднего конца на входе в ОД была выше ($968\text{ }^{\circ}\text{C}$), также предполагается более равномерное распределение температуры в поперечном сечении прутка. На заднем конце прутка температура поверхности ниже ($917\text{ }^{\circ}\text{C}$), и разница температур между осевой зоной и поверхностью больше, при этом в результате деформации измельчение зерен выявляется на меньшем количестве слоев металла. Следует отметить, что занимаемая площадь поперечного сечения с балльностью зерен 4 в осевой зоне обоих концов увеличивалась относительно исходного состояния из-за температуры прокатки ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) близкой к верхней границе зоны T_{III} и дополнительного деформационного разогрева в очаге деформации.

РСР при температуре $T_0 = 1070\text{ }^{\circ}\text{C}$ привела к формированию области с 5 баллом зерна в центре прутка, при этом на переднем конце ближе к поверхности присутствует макроструктура с 4 баллом зерна, а на заднем конце у поверхности зерно соответствует 3 баллу, а промежуточный слой с макроструктурой, соответствующей 4 баллу зерна, отделяет его от центральной зоны (рисунок А.3, а), Толщина слоев с 4 баллом зерна приблизительно равна для обоих концов прутка, однако за счет присутствия на заднем конце тонкого приповерхностного слоя с наименьшим баллом зерна центральная зона с наибольшей балльностью имеет меньший радиус ($0,51R$), чем на переднем конце ($0,77R$).

Влияние разницы температуры поверхности обоих концов оказалось незначительным по сравнению с эффектом высокой температуры прокатки, что подтверждается

равномерностью температуры обоих концов на выходе из ОД (значение $\Delta T_{\text{вых.}}$ близко к 0). На рисунке А.3, а видно, что из-за понижения температуры заднего конца относительно переднего формируется поверхностный слой с минимальной балльностью зерен (3 балла). Прокатка в β -области в данном случае ведет к интенсивному росту зерен при нагреве и деформации, однако после РСП сохраняется градиентность размеров макрозерна по сечению.

Таким образом, повышение температуры прокатки (в β -области) приводит к уменьшению неоднородности макроструктуры прутка, росту размера зерен в центральной части заготовки и уменьшению толщины мелкозернистых приповерхностных слоев. Эти изменения связаны с ростом зерен при высоких температурах, а также, предположительно, с пост-деформационным ростом температуры поверхности за счет внутреннего теплообмена металла. Низкая температура прокатки позволяет сохранить более мелкозернистую структуру у поверхности, однако, увеличивает градиент структуры по радиусу. 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.

На рисунке А.2, б показана микроструктура прутка после прокатки при температуре 930 °С (режим № 2-2). Морфология микроструктуры характеризуется изменением от поверхности к центру, как на переднем, так и на заднем конце. У поверхности наблюдается равноосная мелкозернистая структура, полученная под воздействием интенсивной пластической деформации. Глобулярные частицы α -фазы сильно фрагментированы и равномерно распределены. На середине радиуса и в центре присутствуют колонии вытянутой формы α -фазы и зерна β -фазы между ними. В середине радиуса обоих концов пластины искажены в связи с влиянием деформации и винтового характера течения металла. Также видны мелкие равноосные зерна α -фазы. Толщина α -пластин немного увеличивается ближе к центру, что может быть связано с уменьшением скорости охлаждения в центральной зоне. Также на оси прутка наблюдаются фрагменты α -оторочки крупных первичных зерен β -фазы. В целом, микроструктура образцов от переднего и заднего концов прутка для данного режима является схожей, что соотносится с распределением областей макрозерна по сечению.

После прокатки при температуре 1070 °С, соответствующей β -области, в прутке получена пластинчатая структура, состоящая из крупных β -зерен, что связано с ростом зерен в результате воздействия высокой температуры нагрева под прокатку

(рисунок А.3, б). Внутри зерен наблюдается мартенситная α -фаза. Межзеренные прослойки α -фазы отсутствуют, что объясняется высокой скоростью охлаждения.

Частота вращения валков (n)

Результаты анализа температуры заготовок/прутков при деформации с различной частотой вращения валков представлены на рисунке 3.11. При увеличении частоты вращения валков температура поверхности металла на выходе из валков становится выше, чем на входе, что связано с уменьшением времени прокатки и времени контакта между заготовкой и инструментом, а следовательно, и теплообмена между ними (рисунок 3.11, а). Кроме того, может наблюдаться дополнительный разогрев поверхности, связанный с ростом скорости деформации и выделения тепла от работы трения на контакте с валками.

При $n = 20$ об/мин происходит остывание прутка, в результате чего средняя температура после прокатки на $7...8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже $T_{\text{ср.вх.}}$. Увеличение n до 60 об/мин резко меняет картину, приводя к тому, что средняя температура выхода на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем на входе. Дальнейшее повышение частоты до 90 об/мин увеличивает ΔT до $63,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

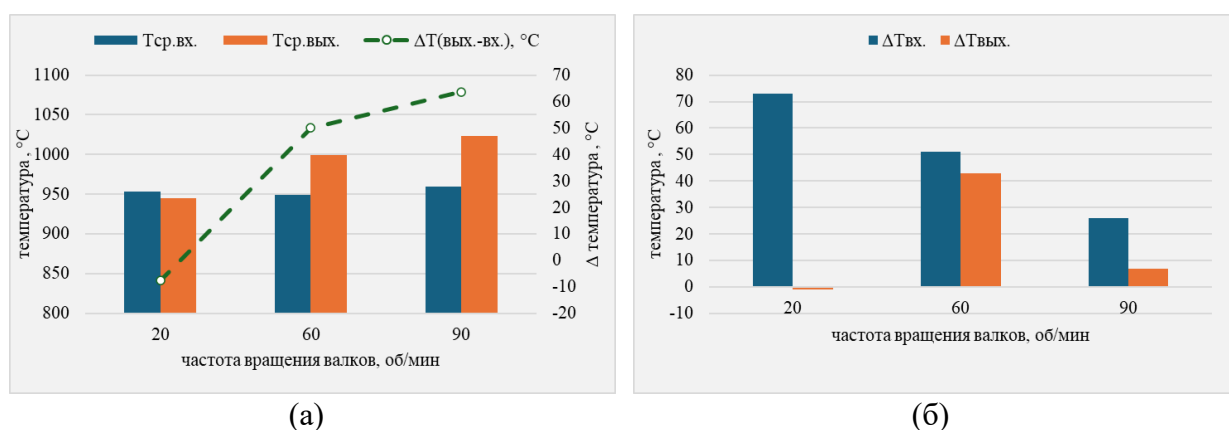


Рисунок 3.11 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), при изменении частоты вращения валков

При низких частотах вращения валков задний конец прутка успевает охладиться до попадания в очаг деформации, в результате чего он деформируется при температуре значительно ниже, чем передний конец, что приводит к увеличению температурной неоднородности поверхности прутка вдоль его оси на входе (рисунок 3.11, б). Наоборот, при высоких частотах тепловое состояние прутка характеризуется как более равномерное, т.е. разница по длине прутка $\Delta T_{\text{вх.}}$ низкая (рисунок 3.11, б). Величина $\Delta T_{\text{вых.}}$ изменяется неочевидно. При 20 об/мин разница по температуре на выходе для переднего и заднего концов практически отсутствует. При 60 об/мин эта разница существенно возрастает до $43\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем при 90 об/мин снова снижается до $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такое поведение может быть объяснено

ростом деформационного разогрева для заднего конца прутка, температура которого снизилась более чем на 70 °С по сравнению с передним концом. При максимальных оборотах, наоборот, короткое время прокатки не позволяет заднему концу сильно остыть. Кроме этого, накладывается эффект поверхностного разогрева из-за высокой частоты вращения валков.

На рисунках (А.4, а) и (А.5, а) приводятся снимки макроструктуры образцов, полученных от переднего и заднего концов прутков, прокатанных при $n = 20, 90$ об/мин, соответственно, а при $n = 60$ об/мин – на рисунке А.1, а.

При частоте вращения 20 об/мин наблюдается формирование трех зон с различной балльностью: 4 балла в центре прутка, промежуточная зона 3 балла и 2 балла у поверхности (рисунок А.4, а). Толщина приповерхностного слоя примерно одинакова на переднем и заднем концах прутка (0,68R и 0,63R). Слой с зерном 3 балла имеет меньшую толщину на заднем конце, за счет чего макроструктура с наибольшей балльностью занимает центральную зону большего радиуса. Такая неоднородность объясняется температурными градиентами вдоль оси прутка, при которых деформация переднего и заднего концов заготовки происходит при различных температурах (см. рисунок 3.11, б).

В результате прокатки при высокой частоте вращения валков на переднем конце прутка центральная зона радиусом до 0,65R соответствует 3 баллу зерна, у поверхности макроструктура имеет 2 балл (рисунок А.5, а). На заднем конце слой у поверхности также соответствует 2 баллу и имеет такую же толщину, как на переднем конце. За ним до глубины 0,27R наблюдается структура с 3 баллом зерна, а в осевой области сформирована структура с наибольшим 4 баллом зерна. Не стоит исключать в данном случае также фактор наследственности структуры исходной заготовки, которая может незначительно отличаться для разных заготовок.

На рисунке А.4, б представлена микроструктура поперечного сечения переднего и заднего концов прутка после РСР при частоте вращения валков 20 об/мин. Микроструктура поверхности прутка на обоих концах состоит из мелких равноосных зерен с глобулярной α -фазой. В середине радиуса и центре наблюдаются значительные различия между передним и задним концом. На переднем конце эти зоны занимает структура, состоящая из мелкой глобулярной α -фазы и более крупных зерен β -фазы искаженной формы. На заднем конце структура середины радиуса и центра представлена колониями пластинчатой α -фазы в β -матрице, при этом в середине радиуса также присутствует небольшое количество глобулярной α -фазы. Различия микроструктуры обусловлены, так же как макроструктуры, снижением температуры заднего конца прутка по сравнению с передним, в результате чего не была достигнута проработка структуры при малой частоте вращения валков.

Микроструктура прутка, прокатанного при частоте вращения валков 60 об/мин представлена на рисунке А.1, б и описана ранее.

После РСП при 90 об/мин вблизи поверхности прутка сформирована мелкозернистая структура с глобулярной α -фазой (рисунок А.5, б). В середине радиуса и центре переднего конца наблюдаются преимущественно равноосные частицы α -фазы, расположенные по границам более крупных β -зерен. В структуре заднего конца кристаллы α -фазы имеют как глобулярную, так и вытянутую морфологию. При высокой частоте вращения валков достигнута более глубокая проработка структуры прутка, что связано с деформационным упрочнением при высокой скорости [110]. Повышение скорости прокатки способствует сокращению различий как в макро-, так и в микроструктуре переднего и заднего концов прутка.

В данном эксперименте при длине заготовки 305...315 мм не выявлено особых различий в микроструктуре вблизи поверхности прутка. В то время как в осевой зоне прутков наблюдались различия в балльности зерна на макроуровне и типе формирования микроструктуры, связанные с глубиной проработки структуры при деформации. Результаты анализа микроструктуры совпадают с данными анализа температуры поверхности прутков, полученными в ходе экспериментальных прокаток.

Известно [41], что в зависимости от условий деформации, величины температурного интервала при деформации, скорости охлаждения после деформации и др. факторов сочетание полученных структур $\alpha+\beta$ сплавов может сильно отличаться. Так несмотря на то, что при $n = 60$ и 90 об/мин средняя температура на выходе близка к границе $T_{пп}$ или соответствует β -области, полученная микроструктура прутков соответствует типу, характерному условиям $\alpha+\beta$ деформации. Очевидно, это объясняется небольшим временем нахождения в β -области и высокой скоростью охлаждения при закалке.

Коэффициент вытяжки (μ)

При высоком значении коэффициента вытяжки ($\mu = 2,1$) температура поверхности прутка увеличивается на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с температурой на входе (Рисунок 3.12, а), что объясняется увеличенной работой пластической деформации и выделением большего количества тепла в зоне деформации. При низком коэффициенте вытяжки ($\mu = 1,3$) теплоты, выделяемой в результате деформации, недостаточно, что приводит к преобладанию процессов охлаждения поверхности и снижению средней температуры прутка на выходе по сравнению с температурой на входе.

Хотя на входе равномерность распределения температуры вдоль оси прутка при низком коэффициенте вытяжки была выше, на выходе наблюдалась более высокая температурная однородность в случае высокого коэффициента вытяжки (Рисунок 3.12, б).

При $\mu = 2,0$ время достижения З.К. заготовки валков увеличивается, что приводит к росту $\Delta T_{\text{вх.}}$. Это может быть связано с тем, что при большом обжатии внутреннее тепло, сгенерированное деформационным разогревом, не позволяет быстро остывать поверхности после выхода из валков, уменьшая неравномерность температуры поверхности прутка вдоль его оси. Таким образом, высокое значение коэффициента вытяжки обеспечивает более равномерное температурное поле по длине прутка за счет увеличения интенсивности деформационных процессов и тепловыделения, тогда как при низком значении коэффициента вытяжки температурный градиент остается более выраженным.

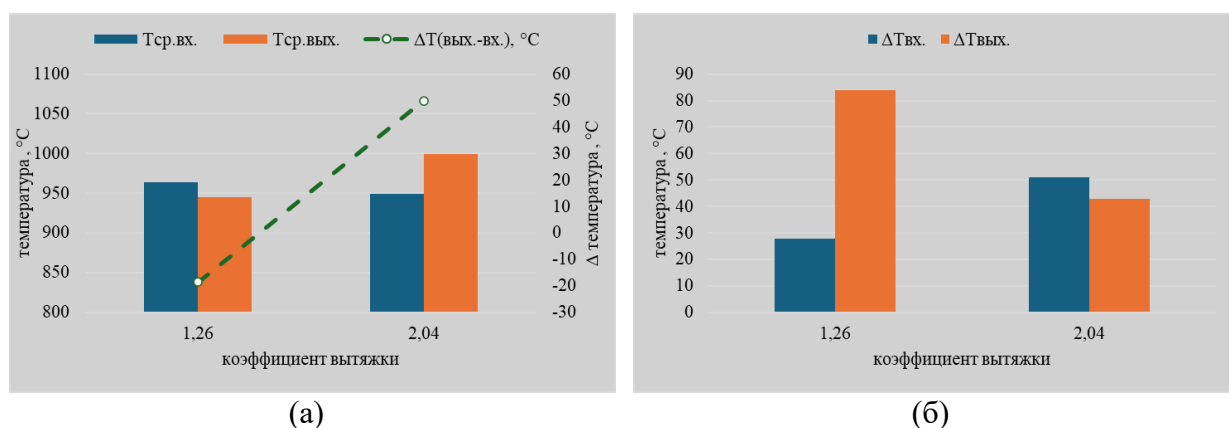


Рисунок 3.12 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), при различных коэффициентах вытяжки

Макро- и микроструктура образцов П.К. и З.К. прутка, прокатанного при $\mu = 1,3$, представлена на рисунке А.6. РСП при $\mu = 1,3$ привела к образованию на переднем конце центральной зоны радиусом до $0,55R$ с максимальным 4 баллом зерна (рисунок А.6, а). Наименьший балл зерна равный 2 наблюдается у поверхности на глубине до $0,78R$. Между этими зонами расположена область с 3 баллом зерна. На заднем конце можно выделить макроструктуру, соответствующую 3 баллу, в центре прутка. Вблизи поверхности зерно соответствует 2 баллу. Граница между структурой различной балльности проходит на глубине $\sim 0,66R$.

Микро- и макроструктура прутка, прокатного с коэффициентом вытяжки $\mu = 2,0$ представлена на рисунке А.1 и описана ранее.

На поверхности прутка после РСП с коэффициентом вытяжки 1,3 сформирована равноосная мелкозернистая структура с достаточно крупными частицами α -фазы округлой формы (рисунок А.6, б). На середине радиуса и в центре присутствует как глобулярная, так и пластинчатая α -фаза внутри зерен β -фазы, при этом на заднем конце количество структурных единиц с глобулярной морфологией и их объемная доля больше, чем на

переднем. Также на заднем конце наблюдаются крупные α -пластины, расположенные между β -зернами. В центре и на середине радиуса заднего конца прутка можно выделить зоны, внутри которых пластины имеют преимущественную ориентировку.

Таким образом, в рамках исследуемых режимов прокатки при коэффициенте вытяжки $\mu = 2,0$ обеспечивается большая глубина проникновения деформации и более интенсивную проработку структуры поверхностных слоёв прутка по сравнению с режимом $\mu = 1,3$. Однако при $\mu = 2,0$ более интенсивный деформационный разогрев приводит к росту зерна в осевой зоне.

Количество проходов (i_{Σ})

Пруток, полученный при прокатке с коэффициентом вытяжки $\mu = 1,3$, был дополнительно деформирован за 3 прохода до достижения суммарного коэффициента вытяжки $\mu = 2,0$.

Анализ данных свидетельствует о том, что при многопроходной прокатке средняя температура поверхности заготовки на входе в каждый последующий проход уменьшается по сравнению с предыдущим ($T_{\text{ср.вх.}}^{i=1} > T_{\text{ср.вх.}}^{i=2} > T_{\text{ср.вх.}}^{i=3} > T_{\text{ср.вх.}}^{i=4}$) (рисунок 3.13, а). Это объясняется тем, что во время транспортировки заготовки меньшего диаметра более интенсивно охлаждаются. Также наблюдается более однородное распределение температуры между передним и задним концом как на входе, так и на выходе из ОД (рисунок 3.13, б).

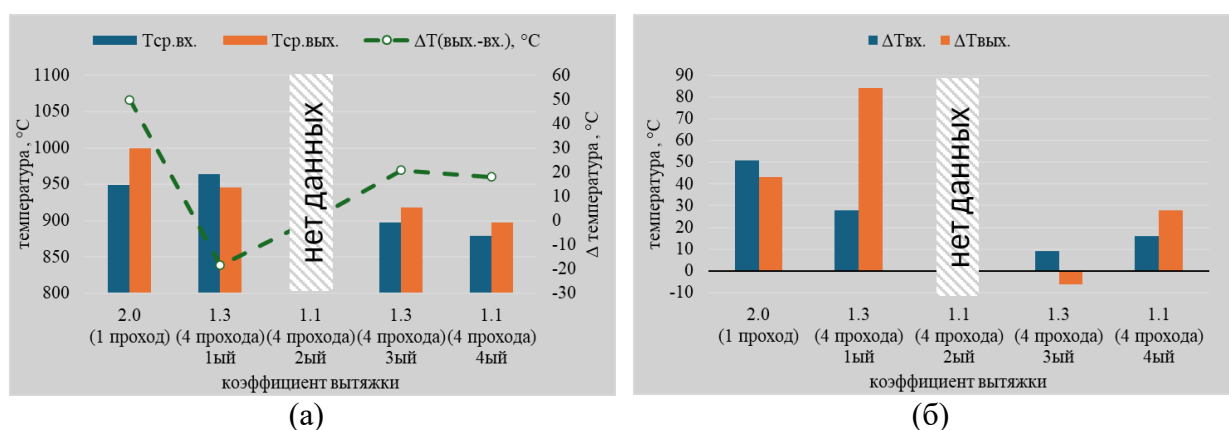


Рисунок 3.13 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), за разное количество проходов

Прокатка за 1 проход приводит к интенсивному деформационному разогреву, в результате чего температура поверхности прутка на выходе из валков повышалась на $\Delta T_{\text{вых.-вх.}} = 50$ °C, и достигала границы диапазона $T_{\text{пп}}$. В случае прокатки за 4 прохода повышение температуры было менее значительным и составило максимум 20 °C в третьем

проходе. Увеличение количества проходов приводит к сужению диапазона, в пределах которого изменяется температура поверхности прутка при исследуемых режимах прокатки.

При прокатке за 4 прохода вблизи поверхности на глубине до 0,69R на переднем конце сформирована структура со 2 баллом зерна, а на заднем конце – до 0,73R с 1 баллом (рисунок А.7, а). Балльность центральной зоны также отличается и составляет 3 и 2 балла для переднего и заднего концов, соответственно.

На переднем и заднем концах прутка после РСП за 4 прохода не выявлено значительных отличий в микроструктуре (рисунок А.7, б). На поверхности наблюдается равноосная мелкозернистая структура. В середине радиуса и в центре прутка сформирована смешанная (дулексная) структура, состоящая из глобулярной и пластинчатой α -фазы в β -матрице. Количество равноосных зерен больше на заднем конце прутка.

Таким образом, увеличение количества проходов приводит к повышению равномерности структуры как в поперечном, так и в продольном сечении. Также получение в осевой зоне более мелких зерен свидетельствует о большей проработке структуры. Это обусловлено тем, что при прокатке в один проход средняя температура поверхности прутка на выходе возрастает и приближается к 1000 °С, сохраняя высокую температуру в осевой зоне, что приводит к росту зерен в ней. В случае многопроходной прокатки при том же суммарном коэффициенте вытяжки меньший коэффициент вытяжки в каждом проходе обеспечивает незначительное повышение температуры поверхности по сравнению с режимом № 2-1 ($\Delta T = -20...+20$ °С, таблица 3.2). В результате вероятность остывания осевой зоны становится больше, в результате чего снижается вероятность увеличения зерна в ней.

Длина заготовки (L_0)

Анализ данных показал, что при различной длине заготовок в рамках исследованных режимов РСП, нет значительных изменений средней температуры на входе и выходе ОД (рисунок 3.14, а).

Для коротких заготовок наблюдается однородность температуры на поверхности металла вдоль оси заготовки как на входе в валки, так и на выходе из них (рисунок 3.14, б). В то же время, для длинных заготовок отмечается проявление температурной неоднородности, что связано с увеличением длины и, соответственно, более выраженными тепловыми градиентами вдоль оси заготовки. Еще одним фактором, вызывающим продольную неравномерность температуры прутков, может быть схема нагрева заготовок в печи. При проведении эксперимента, все заготовки располагали на подине печи передним концом к окну загрузки/выгрузки.

В результате, чем длиннее заготовка, тем может быть больше разница в температуре переднего и заднего концов. Также некоторое влияние на полученные расчетом данные может оказывать наличие большего или меньшего количества окалины на поверхности прутка. В целом, в рамках рассмотренных режимов можно говорить о том, что перепад температур по длине прутка составляет 40...50 °С, что практически не влияет на среднюю температуру прокатки. Однако при прокатке прутков диаметром менее 40 мм и большей длины эффект градиента по длине будет увеличиваться, что будет проверено в 3 этапе эксперимента.

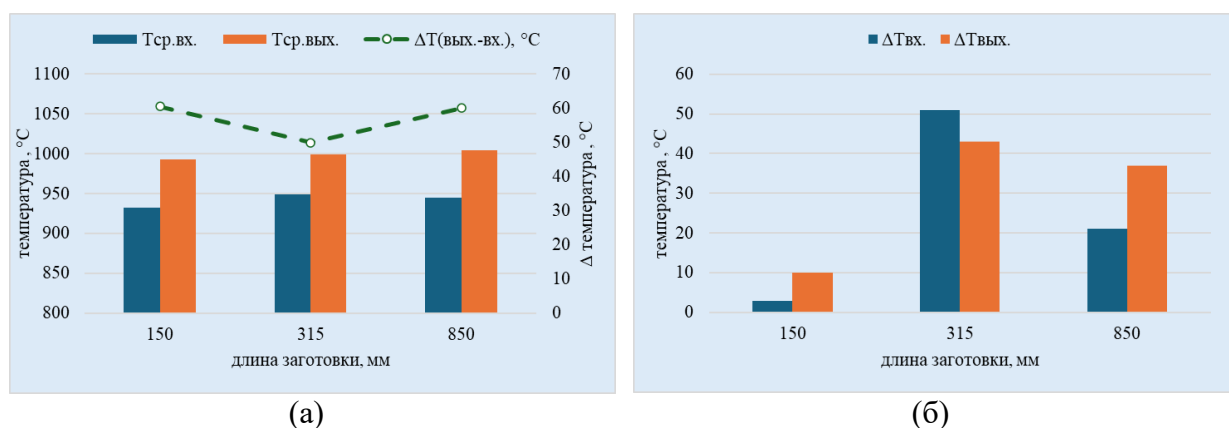


Рисунок 3.14 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), при изменении длины заготовки

Макроструктура образцов переднего и заднего концов прутков, прокатанных из заготовок длиной 850 и 150 мм, представлена на рисунках (А.8, а) и (А.9, а), соответственно, а для прутка из заготовки длиной 315 мм – на рисунке А.1, а. В результате РСП заготовки наибольшей длины ($L_0 = 850$ мм) получена структура, в которой можно выделить три зоны с баллом зерна от 2 вблизи поверхности до 4 в осевой зоне, между ними располагается участок, соответствующий 3 баллу зерна (рисунок А.8, а). Границы выделенных областей практически совпадают для переднего и заднего концов: радиус центральной зоны достигает 0,59R, а глубина слоя с наименьшим баллом зерна составляет 0,76...0,78R.

На обоих концах прутка с исходной длиной 150 мм наблюдаются 3 области с различной балльностью зерна: 2 балла у поверхности, затем 3 балла и 4 балла в центре (рисунок А.9, а). При этом граница зоны с наименьшей балльностью на переднем конце находится немного ближе к оси прутка (0,76R – на П.К. и 0,82R – на З.К.).

При всех длинах заготовок на передних концах прутков получена идентичная макроструктура, что подтверждает повторяемость и стабильность условий проведения

эксперимента, и низкое воздействие человеческого фактора на результаты (время подачи заготовки к стану, время от окончания прокатки до начала закалки и др.).

На рисунке А.8, б представлена микроструктура образцов переднего и заднего концов прутка, полученного в результате РСП заготовки длиной 850 мм. Микроструктура П.К. и З.К. прутка является схожей. Наблюдается мелкозернистая структура у поверхности, между β -зернами находятся червячнообразные и глобулярные кристаллы α -фазы. В середине радиуса и центральной зоне тип микроструктуры пластинчатый. Вблизи оси прутка пластины α -фазы становятся длиннее и образуют небольшие колонии с различной ориентацией. В центральных зонах обоих концов прутка наблюдаются оторочки исходных крупных β -зерен. Отличия в наблюдаемой микроструктуре прутка, полученного из заготовки длиной 315 мм, по сравнению с остальными можно объяснить различиями в структуре исходных заготовок (рисунок А.1, б).

На поверхности прутка с исходной длиной 150 мм после РСП сформирована структура, состоящая из β -зерен, внутри которых наблюдаются различно ориентированные колонии пластинчатой α -фазы. Между зернами присутствуют фрагменты α -фазы (рисунок А.9, б). Структура с той же морфологией зафиксирована на середине радиуса переднего конца. В соответствующей области заднего конца, а также в центре обоих концов прутка видны фрагменты α -фазы, расположенной на границе исходных более крупных β -зерен. В середине радиуса обоих концов также присутствуют крупные пластины α -фазы искаженной формы, при этом их количество значительно больше на заднем конце. В центральной области их количество увеличивается на обоих концах, пластины приобретают более правильную форму и локальную ориентацию.

Полученные в данном эксперименте макро- и микроструктуры являются однотипными, что говорит о близких температурно-деформационных условиях, однако существуют другие факторы, чье воздействие также играет роль, в частности температура инструмента, схема нагрева или исходная микроструктура заготовок.

3.2.3 Третий этап: прокатка на министане 14-40

Для каждого прутка получены снимки макро- и микроструктуры в поперечном сечении на переднем и заднем концах, которые представлены в **приложении А**.

На основе данных о температуре поверхности заготовок/прутков рассчитаны параметры, приведённые в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты данных мониторинга РСП на министане 14-40 (этап №3)

№ режима	i	Т вход, °С			Т выход, °С			τ , с	$\Delta T_{\text{ВЫХ.-ВХ.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{ВЫХ.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{ВХ.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{п.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{з.}}, ^\circ\text{C}$
		$T_{\text{п.к.}}$	$T_{\text{з.к.}}$	$T_{\text{ср.вх.}}$	$T_{\text{п.к.}}$	$T_{\text{з.к.}}$	$T_{\text{ср.вых.}}$						
2-3-1	1	1024	1002	1004,9	989	994	989,3	12,09	-15,6	-5	22	35	8
	2	880	837	855,2	926	906	931,3	19,67	76,1	20	43	-46	-69
	3	881	810	847,5	930	916	927,5	27,27	80,0	14	71	-49	-106
	4	872	835	854,1	882	843	865,2	17,56	11,1	39	37	-10	-8
2-2-1	1	923	905	903,9	901	917	903,2	8,54	-0,7	-16	18	22	-12
	2	892	874	883,6	894	889	895,2	9,63	11,6	5	18	-2	-15
	3	884	867	882,8	903	909	905,2	11,79	22,4	-6	17	-19	-42
	4	880	857	871,0	880	881	878,5	13,33	7,5	-1	23	0	-24
	5	881	861	865,8	891	886	884,6	14,49	18,9	5	20	-10	-25
	6	889	851	865,6	871	843	874,7	19,84	9,1	28	38	18	8
	7	876	848	860,6	886	868	878,1	19,77	17,5	18	28	-10	-20
	8	878	815	851,8	885	855	856,8	23,93	5,0	30	63	-7	-40
	9	882	849	861,0	888	864	880,9	14,79	20,0	24	33	-6	-15
	10	874	827	853,3	867	821	850,4	17,56	-2,8	46	47	7	6
2-1-1	1	995	960	974,4	968	952	956,7	11,25	-17,6	16	35	27	8
	2	1007	857	938,4	1003	971	984,7	19,37	46,4	32	150	4	-114
	3	965*	856	874,2	965	921	939,8	27,75	65,7	44	109	0	-65
3-1-1	1	958	905	939,5	920	916	916,5	21,40	-23,0	4	53	38	-11
	2	994	916	963,2	1000	972	987,2	19,37	24,0	28	78	-6	-56
	3	986	898	936,8	1000	952	967,9	19,64	31,0	48	88	-14	-54
3-2-1	1	972	915	942,5	950	937	948,0	11,60	5,5	13	57	22	-22
	2	973	899	940,3	990	962	977,5	17,69	37,2	28	74	-17	-63
	3	916	814	857,1	900	845	867,0	21,35	9,9	55	102	16	-31
	4	877	805	849,0	889	852	868,5	19,34	19,5	37	72	-12	-47
	5	878	795	839,7	880	819	848,4	24,73	8,8	61	83	-2	-24
3-3*-1	1	959	914	939,9	911	920	920,6	6,43	-19,3	-9	45	48	-6
	2	921	870	902,8	937	929	930,5	8,47	27,8	8	51	-16	-59
	3	932	874	902,7	937	935	935,2	12,23	32,5	2	58	-5	-61
	4	909	848	882,5	941	911	919,9	16,60	37,4	30	61	-32	-63
	5	936	805	872,2	936	890	906,0	23,17	33,9	46	131	0	-85
1-2-1	1	957	887	919,0	940	927	930,6	26,81	11,7	13	70	17	-40
	2	934	873	900,8	951	929	938,6	18,18	37,7	22	61	-17	-56
	3	905	796	841,6	887	860	873,1	44,79	31,5	27	109	18	-64
	4	894	767	830,6	895	862	876,2	54,61	45,6	33	127	-1	-95
	5	896	711	800,5	875	806	835,7	60,09	35,2	69	185	21	-95
1-2-2	1	957	887	919,0	940	927	930,6	26,81	11,7	13	70	17	-40
	2	935	871	900,0	953	935	943,5	18,18	43,5	18	64	-18	-64
	3	899	850	869,6	923	925	927,7	14,46	58,1	-2	49	-24	-75
	4	880**	860*	870,0**	880**	940**	910,0**	...	40,0**	...	...	...	...
	5	887	773	837,1	923	890	903,6	21,17	66,5	33	114	-36	-117

** Значения получены расчетным путем

Режим прокатки № 2-3-1

На рисунке 3.15 представлены результаты анализа температурного поля заготовки/прутка для режима № 2-3-1.

В первом проходе ($T_0 = 1060^\circ\text{C}$, $\mu = 1,7$) температура поверхности прутка на выходе из валков ниже температуры на входе (рисунок 3.15, а). Во втором и третьем проходах

($T_0 = 930$ °С, $\mu = 1,9$ и $1,4$ соответственно) наблюдается повышение температуры на $\Delta T_{\text{вых.}-\text{вх.}} = 76 \dots 80$ °С. Это свидетельствует о влиянии температуры прокатки на величину деформационного разогрева и его вклад в изменение температуры поверхности прутка на выходе из ОД при любом коэффициенте вытяжки.

Значение $\Delta T_{\text{вых.}-\text{вх.}}$ приближается к нулю при $T_0 = 930$ °С и $\mu = 1,2$ в четвёртом проходе (рисунок 3.15, а). Так же сохраняется неоднородность температуры прутка на выходе из очага деформации ($\Delta T_{\text{вх.}} = 37$ °С, $\Delta T_{\text{вых.}} = 39$ °С) в связи с минимальным коэффициентом вытяжки и незначительной величиной деформационного разогрева.

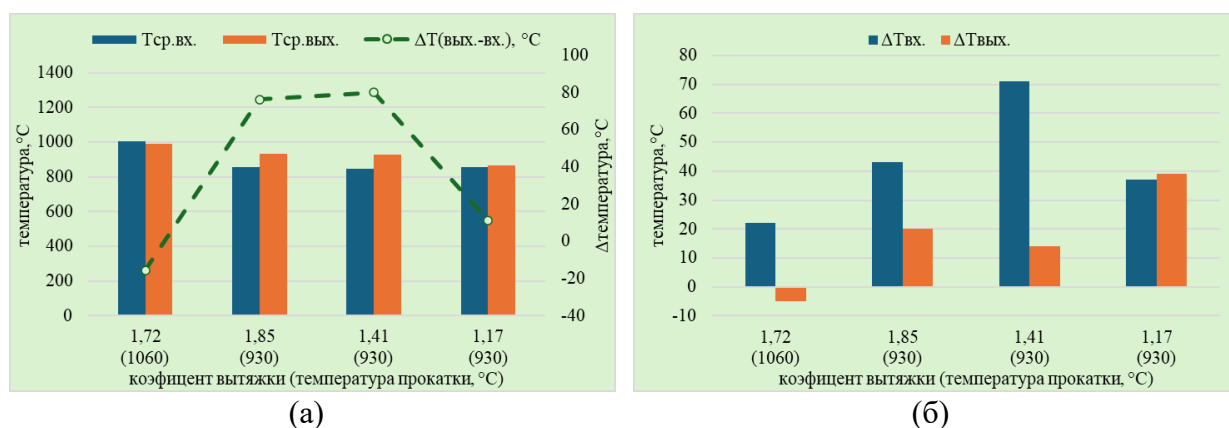


Рисунок 3.15 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), в каждом проходе прокатки по режиму № 2-3-1

Однородность температуры заготовки вдоль оси прутка на входе в ОД снижается (рисунок 3.15, б) за счёт увеличения длины заготовки в каждом последующем проходе. Перед четвёртым проходом заготовка была порезана пополам, поэтому $\Delta T_{\text{вх.}}$ уменьшилась по сравнению с предыдущим проходом.

Макроструктура на переднем и заднем концах прутка характеризуется практически идентичным распределением балльности зерна в поперечном сечении (рисунок А.10, а). Можно выделить три зоны с различным баллом зерна: у поверхности зерно 1 балла, далее зона со 2 баллом зерна и область вокруг оси с 3 баллом. Переходная зона между 1 и 2 баллом совпадает для переднего и заднего конца (на расстоянии $\sim 0,69R$ от оси прутка), а наиболее крупные зерна занимают зону большего радиуса на переднем конце ($\sim 0,39R$), и $\sim 0,31R$ на заднем.

В микроструктуре прутка, полученного по режиму 2-3-1, вблизи поверхности наблюдается равномерное распределение деформированных фрагментов пластин и мелкодисперсная α -фаза (рисунок А.10, б). В середине радиуса обоих концов прутка и в центре переднего конца можно выделить колонии α -пластин искаженной формы. В осевой

зоне на заднем конце пластины имеют более правильную форму, а также видны отдельные выделения α -фазы вдоль границы β -зерен.

Несмотря на неоднородное структурное состояние поперечного сечения полученного прутка, по сравнению с его исходным состоянием можно отметить уменьшение размера зерна макроструктуры на 2 балла и изменение морфологии микроструктуры по всему сечению прутка.

Режим прокатки № 2-2-1

Во всех проходах, где коэффициент вытяжки μ превышал 1,13, температура поверхности прутка на выходе из ОД была выше температуры на входе (на 22 °С и меньше) (рисунок 3.16, а). Характеристика равномерности температуры заготовки/прутка вдоль его оси (рисунок 3.16, б) аналогична наблюдавшейся в режиме № 2-3-1 по тем же причинам. Разница температур по длине возрастает с увеличением длины прутка и для первых 5 проходов (длина прутка ~1000...1100 мм) составляет около 20 °С, после чего начинает интенсивно возрастать до максимальных значений 60...70 °С. Для прутка на выходе неравномерность по длине также закономерно увеличивается с ростом длины прутка вне зависимости от величины деформационного разогрева в очаге деформации.



Рисунок 3.16 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), в каждом проходе прокатки по режиму № 2-2-1

На обоих концах прутка после прокатки по режиму 2-2-1 от поверхности до $\sim 0,58R$ наблюдается макроструктура с 1 баллом зерна (рисунок А.11, а). На переднем конце всю оставшуюся площадь поперечного сечения занимает зерно, соответствующее 2 баллу. На заднем конце в осевой зоне радиусом $\sim 0,36R$ сформирована зона с 3 баллом зерна. От области с наименьшим баллом зерна её отделяет промежуточный слой со 2 баллом зерна.

Вблизи поверхности на обоих концах прутка, прокатанного по данному режиму, наблюдается равномерная мелкозернистая микроструктура из смеси α и β фаз (рисунок А.11, б). При приближении к центру форма зерен α -фазы становится более вытянутой и менее фрагментированной, появляется локальная ориентация пластин. В центре присутствуют отдельные небольшие участки остаточных α -колоний. На заднем конце структурные элементы α -фазы имеют большую толщину ($\sim 0,96$ мкм для П.К. и $\sim 1,9$ мкм для З.К.).

Макро- и микроструктура прутка, полученного по данному режиму РСП, характеризуется более проработанной структурой и небольшой разницей между передним (П.К.) и задним (З.К.) концами. Такая разница, а также и присутствие зерен 3-го балла в осевой зоне заднего конца (в отличие от переднего), могут быть обусловлены технологией прокатки без смены направления. Для рассматриваемого режима задний конец находится в более разогретой области печи в периоды между 10 проходами.

В рамках выбранных параметров прокатки, увеличение количества проходов и отсутствие первого прохода с деформацией при повышенной температуре приводят к улучшению качества структуры (более фрагментированные фазы в осевой части), однако может сопровождаться снижением экономической эффективности из-за роста числа проходов.

Режим прокатки № 2-1-1

На рисунке 3.17 представлены результаты анализа температуры поверхности прутка на входе и на выходе из ОД. За счёт увеличения длины заготовки заднему концу требуется больше времени для достижения входа в ОД, что приводит к уменьшению средней температуры на входе ($T_{\text{ср.вх.}}$) (рисунок 3.17, а). При этом вклад деформационного разогрева оказывается более значительным при пониженной температуре поверхности заготовки на входе в ОД, что увеличивает значение $\Delta T_{\text{вых.-вх.}}$ (до 66 °С в третьем проходе).

Несмотря на существенную неравномерность по длине прутка на входе, которая достигает ~ 150 °С во втором проходе (рисунок 3.17, б), температурный клин прутка на выходе составляет не более 45 °С для максимальной длины прутка 2250 мм.

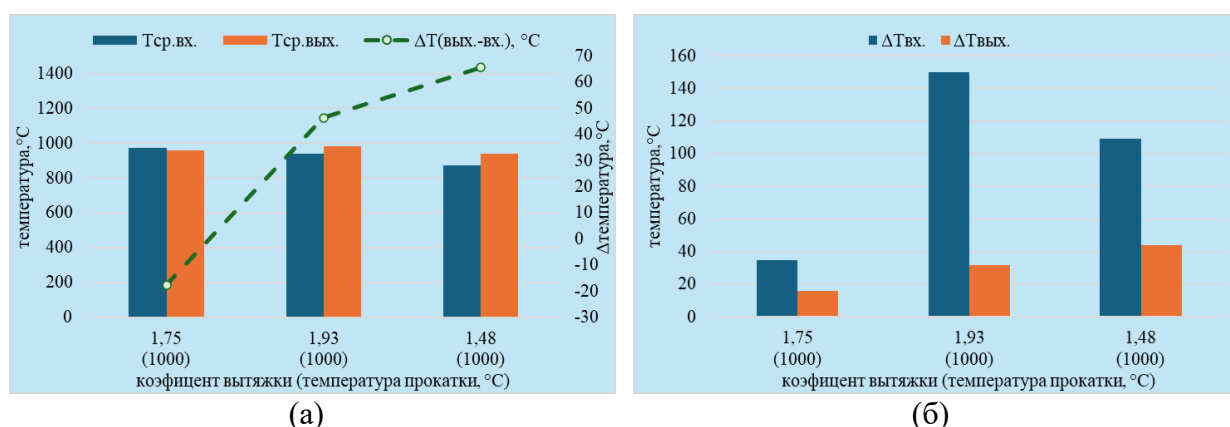


Рисунок 3.17 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), в каждом проходе прокатки по режиму № 2-1-1

В результате прокатки по данному режиму на обоих концах прутка получена структура центральной зоны со 2 баллом зерна (рисунок А.12, а). На переднем конце ее радиус составляет $\sim 0,64$ от радиуса прутка, а на заднем – $\sim 0,43R$. Остальную площадь сечения до поверхности на обоих концах прутка занимает макроструктура с 1 баллом.

Микроструктура переднего и заднего концов прутка, полученного при прокатке по режиму № 2-1-1, представлена на рисунке А.12, б. Наблюдается структура смешанного типа (дулексная) на обоих концах. Между колониями тонких α -пластин, расположенных внутри мелких зерен β -матрицы, присутствуют крупные равноосные зерна α -фазы. При визуальной оценке их объемная доля больше на заднем конце прутка. В центральной части переднего конца и во всех областях сечения заднего конца присутствуют также выделения по границам β -зерен (рисунок А.12, б).

В результате анализа температурного поля прутка при трех предыдущих режимах РСП следует, что повышение температуры поверхности прутка на выходе из ОД определяется комбинацией T_0 и μ . Для заготовки диаметром ~ 32 мм и длиной ~ 800 мм, прокатка при $T_0 = 930$ °C и $\mu = 1,2$ (режим № 2-2-1, $i = 4$) обеспечивает $\Delta T_{вых.-вх.} = 7,5$ °C, а повышение μ до 1,9 (режим № 2-3-1, $i = 2$) увеличивает $\Delta T_{вых.-вх.}$ до 76 °C за счет более интенсивного деформационного разогрева. При том же уровне обжатия повышение T_0 до 1000 °C (режим № 2-1-1, $i = 2$) снижает вклад деформационного разогрева в прирост температуры поверхности прутка на выходе из ОД относительно входа. Аналогичный эффект наблюдается для заготовки меньшего диаметра и большей длины ($D_0 \sim 23$ мм, $L_0 \sim 1500$ мм), но с более значительными изменениями $\Delta T_{вых.-вх.}$: режим № 2-2-1, $i = 8$ ($T_0 = 930$ °C, $\mu = 1,2 \rightarrow \Delta T_{вых.-вх.} = 5$ °C); режим № 2-3-1, $i = 3$ ($T_0 = 930$ °C, $\mu = 1,4 \rightarrow \Delta T_{вых.-вх.} = 80$ °C); режим № 2-1-1, $i = 3$ ($T_0 = 1000$ °C, $\mu = 1,5 \rightarrow \Delta T_{вых.-вх.} = 65,7$ °C).

Режим прокатки № 3-1-1

В результате анализа температуры поверхности заготовки/прутка в ходе прокатки по режиму № 3-1-1 (рисунок 3.18, а) выявлен аналогичный режиму № 2-1-1 характер изменения значений ($T_{\text{ср.вх.}}$, $T_{\text{ср.вых.}}$, $\Delta T_{\text{вых.-вх.}}$). Из-за увеличения длины заготовки в каждом последующем проходе прокатки значения ($\Delta T_{\text{вх.}}$, $\Delta T_{\text{вых.}}$) возрастают (рисунок 3.18, б). Кроме того, увеличение $\Delta T_{\text{вых.-вх.}}$ может быть связано с влиянием повышения частоты вращения валков в каждом последующем проходе, сокращающей время контакта заготовки с валками и, соответственно, теплообмена с ними, что подтверждается увеличением значения $\Delta T_{\text{п.}}$ в абсолютном выражении (таблица 3.3).

Также можно отметить влияние частоты вращения валков на равномерность температуры поверхности прутка на входе в ОД. В первом проходе при режиме № 2-1-1 ($n = 60$ об/мин) значение $\Delta T_{\text{вх.}} = 35$ °С было ниже, чем в случае первого прохода режима № 3-1-1 (при $n = 30$ об/мин, $\Delta T_{\text{вх.}} = 53$ °С). Напротив, значение $\Delta T_{\text{вх.}}$ при режиме № 2-1-1 ($i = 3$, $n = 60$ об/мин) превышает показатель для аналогичного прохода режима № 3-1-1 ($i = 3$, $n = 90$ об/мин) – 109 и 88 °С, соответственно.

Деформация по режиму № 3-1-1 привела к формированию в центре прутка макроструктуры, соответствующей 2 баллу (рисунок А.13, а). Занимаемая ею область сменяется 1 баллом зерна примерно на середине радиуса прутка на заднем конце, а на переднем конце примерная граница находится на расстоянии $\sim 0,64R$ от оси.

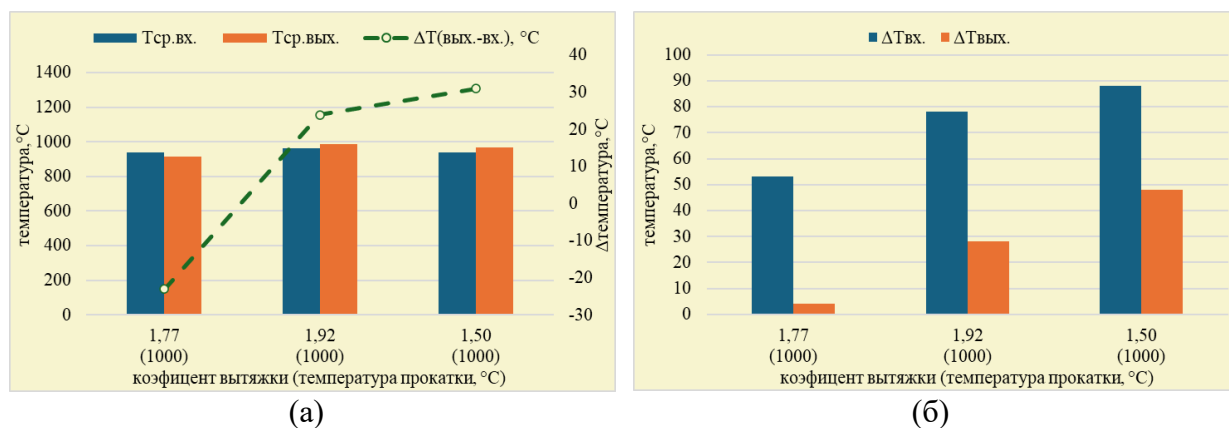


Рисунок 3.18 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), в каждом проходе прокатки по режиму № 3-1-1

Микроструктура прутка на переднем и заднем конце относится к смешанному типу (рисунок А.13, б). На переднем конце наблюдаются мелкодисперсные различно ориентированные колонии пластинчатой α -фазы внутри β -зерен и глобулярные зерна α -фазы. Присутствуют также выделения α -фазы по границам зерен, протяженность которых

увеличивается при приближении к оси прутка. В поперечном сечении заднего конца прутка присутствует большая объемная доля равноосных α -зерен, при этом колонии α -фазы имеют более дисперсную морфологию. Размеры β -зерен меньше на заднем конце, о чем свидетельствует более плотное расположение фрагментов α -оторочек.

Таким образом, результаты прокатки по данному режиму ($i_{\Sigma} = 3$, $T_0 = 1000$ °С, увеличение частоты вращения валков) имеют схожие характеристики с результатами режима № 2-1-1 ($n = \text{const}$) по температурному и структурному состоянию полученного прутка. Это обусловлено слабым влиянием изменения частоты вращения в рамках выбранных значений остальных параметров прокатки.

Режим прокатки № 3-2-1

Результаты анализа изменения температуры поверхности заготовки/прутка представлены на рисунок 3.19. В ходе первого и второго проходов ($T_0 = 1000$ °С) наблюдается рост значения $\Delta T_{\text{вых.}-\text{вх.}}$ во втором проходе за счёт увеличения μ (рисунок 3.19, а). Такое же поведение отмечается и в четвертом проходе ($T_0 = 930$ °С) по той же причине, однако изменение менее выражено. Увеличение значений ($T_{\text{ср.вх.}}$, $T_{\text{ср.вых.}}$) (рисунок 3.19, б) обусловлено ростом длины заготовки и прутка на каждом последующем проходе по сравнению с предыдущим. После обрезки 400 мм от длины прутка по окончании третьего прохода значения ($T_{\text{ср.вх.}}$, $T_{\text{ср.вых.}}$) уменьшились, а затем вновь увеличились в четвёртом проходе.

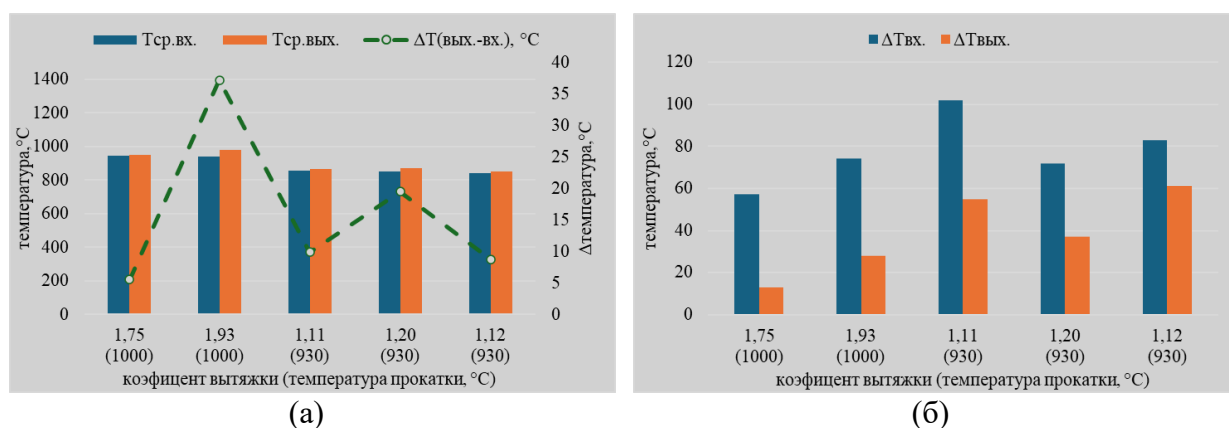


Рисунок 3.19 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), в каждом проходе прокатки по режиму № 3-2-1

Макроструктура поперечного сечения переднего и заднего концов прутка, характеризуется равномерной матовой поверхностью и соответствующей 1 баллу на обоих концах прутка (рисунок А.14, а).

Микроструктура не имеет различий в поперечном сечении и между П.К. и З.К. Наблюдаемый тип микроструктуры является смешанным (рисунок А.14, б). Присутствуют крупные глобулярные зерна α -фазы, между которыми наблюдаются вытянутые фрагменты (пластины) той же фазы различной толщины и ориентации по границам и внутри мелких β -зерен. В сравнении с предыдущими двумя режимами объемная доля α -фазы в целом и количество её зёрен глобулярной формы возросли, что объясняется деформацией при температуре $T_0 = 930^\circ\text{C}$ в последних трех проходах. Сравнивая структурное состояние прутка с полученным при режиме № 2-3-1, можно заключить, что увеличение количества проходов на стадии первичной деформации (при одновременном снижении T_0 на этой стадии до уровня верхней границы $T_{пп}$) способствует более равномерной проработке структуры, а также снижению балла зерна на 3 единицы в осевой зоне (на З.К.).

Режим прокатки № 3-3*-1

На основе анализа термического состояния прутка при прокатке по режиму № 3-3*-1 (рисунок 3.20) можно отметить, что разница между средней температурой поверхности прутка на входе и выходе из ОД незначительно изменяется во 2...4 проходах при коэффициентах вытяжки $\mu = 1,4 \dots 1,5$ ($\Delta T_{\text{вых.}-\text{вх.}} = 27 \dots 37^\circ\text{C}$) (рисунок 3.20, а). В первом проходе значение $\Delta T_{\text{вых.}-\text{вх.}}$ было существенно ниже при $\mu = 1,3$. Это обусловлено деформационным разогревом, который проявляется сильнее при относительно больших коэффициентах вытяжки.

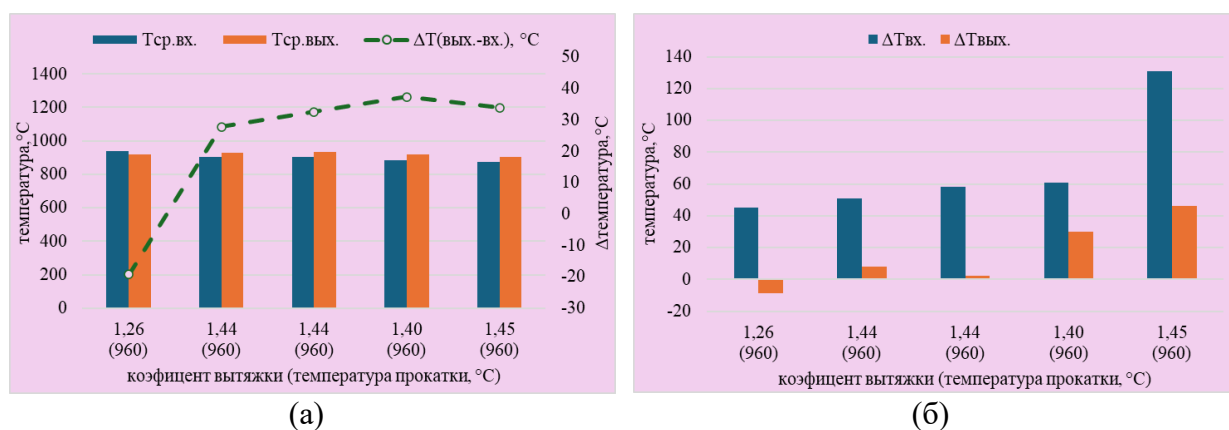


Рисунок 3.20 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), в каждом проходе прокатки по режиму № 3-3*-1

Как и в предыдущих режимах прокатки, увеличение длины заготовки/прутка приводит к росту неоднородности температуры прутка вдоль его оси как на входе, так и на выходе из ОД, что отражено на рисунке 3.20, б. Также можно отметить значительный рост

неравномерности температуры прутка по длине на входе при длине заготовки свыше 1200 мм.

В поперечном сечении обоих концов прутка можно выделить две области с различной балльностью зерна: 2 балла в центре и 1 балл в оставшейся части поперечного сечения (рисунок А.15, а). Приблизительный переход между этими зонами находится на расстоянии $\sim 0,31R$ от оси на переднем конце и на расстоянии $\sim 0,4R$ на заднем.

Снимки микроструктуры поперечного сечения полученного прутка представлены на рисунке А.15, б. На обоих концах прутка сформирована равномерная мелкозернистая микроструктура, состоящая из α -зерен в β -матрице. С приближением к оси прутка форма α -зерен становится более вытянутой. Визуально можно отметить, что доля α -фазы в структуре на заднем конце меньше, чем на переднем. Это может быть связано с неоднородностью температуры поверхности прутка вдоль его оси на входе в ОД, в ходе последнего прохода, при которой температура поверхности З.К. ниже, чем переднего на 131 °С.

Результаты анализа структурного состояния подтверждают выводы, полученные при изучении режима № 2-2-1: прокатка за 5 проходов вместо 10 при температуре 960 °С вместо 930 °С приводит к более проработанной структуре и уменьшению занимаемой области повышенных значений балла зерна. Это подтверждает необходимость выбора температуры прокатки и количества проходов для достижения баланса между температурой заготовки в момент достижения ОД и выделяемым теплом в результате разогрева деформации.

Сравнивая микро- и макроструктуру прутков полученных по режимам прокатки № 3-2-1, и 3-3*-1, можно отметить, что РСП прутков диаметром 42 мм длиной 400 мм за 5 проходов с $\mu_{\Sigma} = 5,0$ (2 прохода при T_0 , соответствующей верхней границе $\alpha+\beta$ -области с $\mu = 3,4$, и 3 прохода при $T_0 = T_{\text{III}} - 30$ °С, $\mu = 1,5$) приводит к получению прутков длиной 1700 мм с равномерной по всему сечению и длине структурой прутка. Это подчеркивает высокую актуальность выбора параметров для каждого прохода процесса РСП при деформации прутков из двухфазных титановых сплавов.

Режим прокатки № 1-2-1

Результаты анализа изменения температуры поверхности заготовки/прутка при прокатке по режиму № 1-2-1 представлены на рисунке 3.21.

Аналогично режимам 3-2-1 и 3-3*-1, даже при низкой частоты вращения валков ($n = 30$ об/мин) наблюдается зависимость значения $\Delta T_{\text{ВЫХ.}-\text{ВХ.}}$ от коэффициента вытяжки и температуры прутка в ОД (рисунок 3.21, а): в третьем проходе $\Delta T_{\text{ВЫХ.}-\text{ВХ.}} = 31,5$ °С при $\mu = 1,4$, в четвёртом $\Delta T_{\text{ВЫХ.}-\text{ВХ.}} = 45,6$ °С при $\mu = 1,6$.

Значения $\Delta T_{\text{ВХ.}}$ и $\Delta T_{\text{ВЫХ.}}$ по сравнению с режимами 3-2-1 и 3-3*-1 более высокие, однако имеют схожий характер изменения (рисунок 3.21, б). Так, в 3-м, 4-м и 5-м проходах при

режиме № 3-3*-1 минимальное $\Delta T_{\text{вх.}}$ = 58 °С, а максимальное – 131 °С (рисунок 3.20, б), в то время как при режиме № 1-2-1 – 109 и 185 °С, соответственно (рисунок 3.21, б).

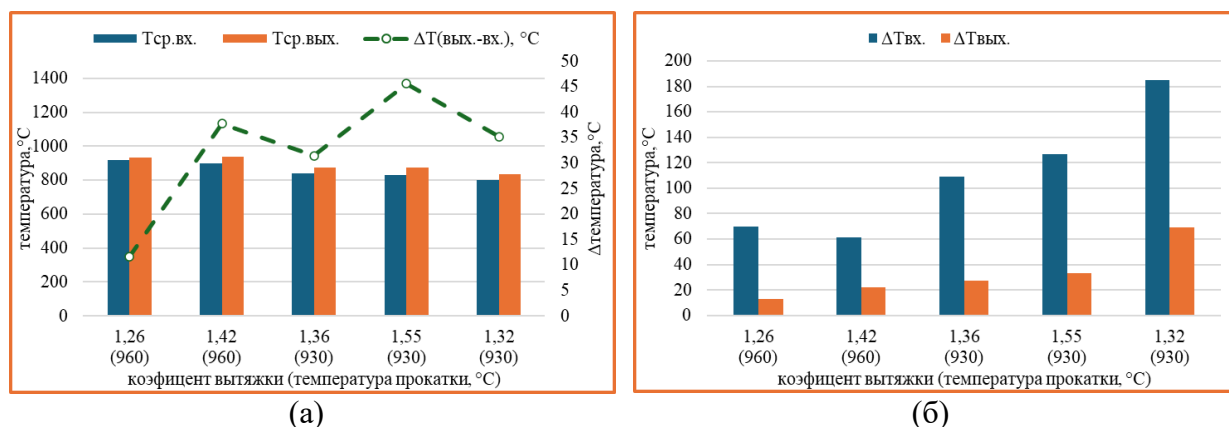


Рисунок 3.21 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), в каждом проходе прокатки по режиму № 1-2-1

На обоих концах прутка, полученного по данному режиму в центре поперечного сечения сформирована макроструктура, соответствующая 2 баллу (рисунок А.16, а). Радиус осевой зоны незначительно отличается и составляет ~0,36R на переднем конце и ~0,33R на заднем. От условной границы этой области до поверхности прутка наблюдается структура с 1 баллом зерна.

Вблизи поверхности сформирована равномерная микроструктура переходного типа, состоящая из глобулярных и вытянутых зерен α -фазы искаженной формы в β -матрице. Визуальная оценка показывает, что доля α -фазы на заднем конце больше, чем на переднем (рисунок А.16, б). В центральной части прутка степень глобуляризации α -фазы снижается, однако наблюдаются единичные глобулярные зерна α -фазы.

Режим прокатки № 1-2-2

Прокатка с высокой частоты вращения валков в последних трех проходах приводит к более высокой температуре на выходе из ОД по сравнению с входом, что отражено в результатах анализа температуры поверхности на рисунке 3.22, а. Значения $\Delta T_{\text{вых.-вх.}}$ на 3-м и 5-м проходах данного режима составляют 58,1 и 66,5 °С, соответственно, в то время как при низкой частоты вращения валков величина $\Delta T_{\text{вых.-вх.}}$ равна 31,5 и 35,2 °С для аналогичных проходов (рисунок 3.21, а).

Распределение температуры поверхности заготовки/прутка вдоль его оси оказывается более равномерным (рисунок 3.22, б) по сравнению с режимами 3-3*-1 и 1-2-1 (при $n = 60$ и 30 об/мин, соответственно). Максимальная разница температур между концами прутка на

выходе из ОД фиксировалась на уровне 33 °С, тогда как при $n = 30$ об/мин и одинаковой длине полученного прутка $\Delta T_{\text{вых.}}$ достигала 69 °С.

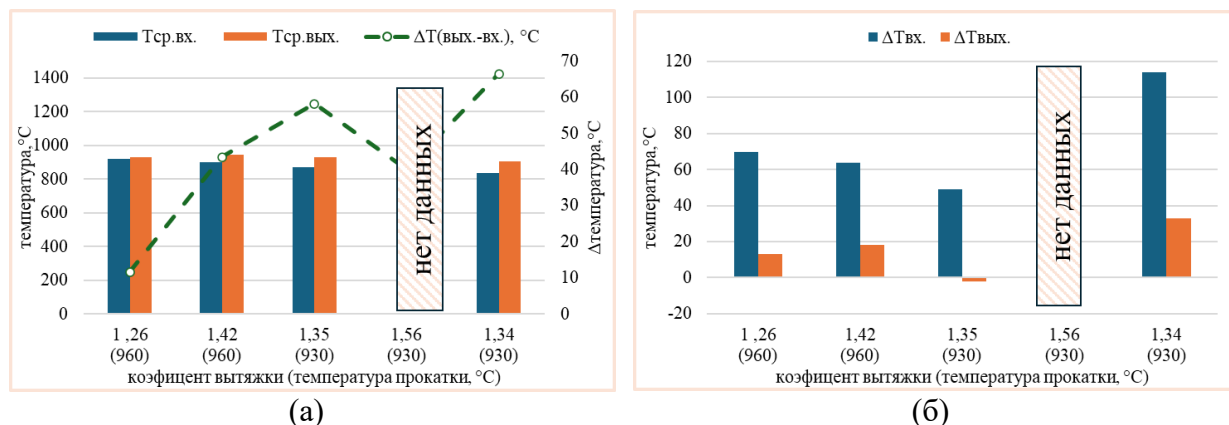


Рисунок 3.22 – Средняя температура прутка и разница между средней температурой входа и выхода (а) и разница между температурами переднего и заднего конца прутка (б), в каждом проходе прокатки по режиму № 1-2-2

Макроструктура не имеет различий как в поперечном, так и в продольном сечении прутка (рисунок А.17, а). Согласно ГОСТ 2692–85 полученная макроструктура соответствует 1 баллу.

Микроструктура на обоих концах прутка, представлена на рисунке А.17, б, и соответствует равноосной с глобулярной формой α -фазы в β -матрице. На основе визуального анализа доля глобулярной α -фазы больше в поперечном сечении переднего конца прутка. На заднем конце прутка в центральной зоне, наблюдаются тонкие α -пластины внутри β -зерен.

Результаты анализа структурного состояния прутков, полученных по режимам прокатки 3-2-1 и 1-2-2, показывают, что для достижения равномерного структурного состояния, а также мелкозернистой макроструктуры (1 балл по всему поперечному сечению), процесс деформации можно проводить при различных вариантах режимов РСП, что позволит снижать неравномерность структуры по длине проката (или увеличить длину получаемых прутков, тем самым снизив расходный коэффициент) и получать требуемый тип микроструктуры.

3.2.4 Анализ эволюции макроструктуры и микроструктуры

По результатам проведенных экспериментов построены диаграммы, показывающие эволюцию балла макроструктуры прутка для трех этапов эксперимента (рисунок 3.23).

Общей закономерностью является постепенное уменьшение балла зерна макроструктуры с увеличением суммарного коэффициента вытяжки и понижением температуры, что говорит об определяющей роли данных параметров в формировании

структуры и свойств. На первом и втором этапах эксперимента практически во всех случаях для заднего конца прутков наблюдается более дисперсная макроструктура с меньшим баллом зерна.

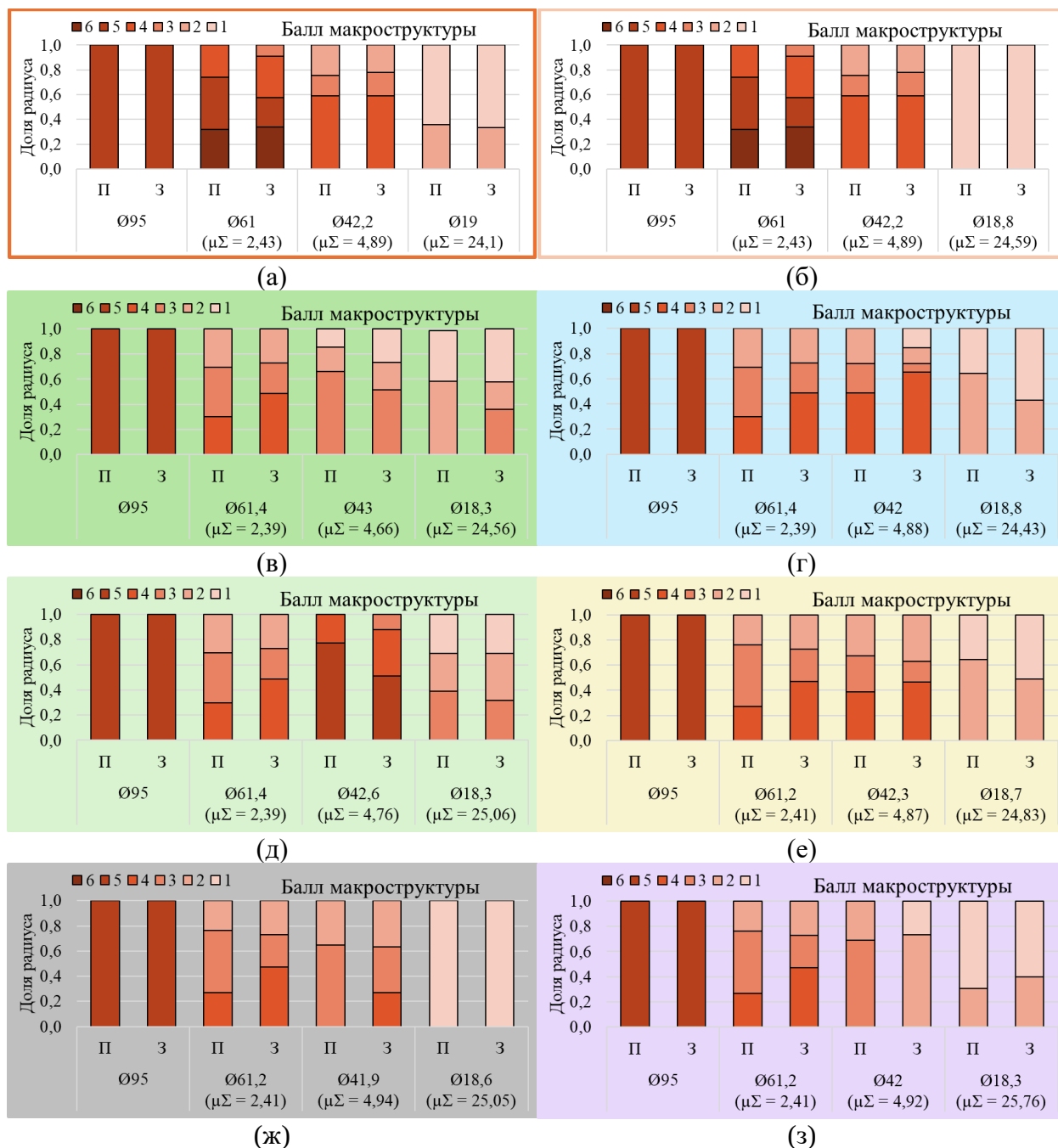


Рисунок 3.23 – Распределение балльности макроструктуры вдоль радиуса прутка, полученное по режимам прокатки 1-2-1 (а); 1-2-2 (б); 2-2-1 (в); 2-1-1 (г); 2-3-1 (д); 3-1-1 (е); 3-2-1 (ж); 3-3*-1 (з)

С точки зрения получения равномерного распределения балла зерна макроструктуры по поперечному сечению и длине прутка, а также общей максимальной проработки

структуры можно выделить режимы 1-2-2 и 3-2-1 (рисунок 3.23, б и ж). Для них в конце третьего этапа получена равномерная макроструктура с 1 баллом макрозерна.

Все опробованные режимы РСП показали эволюцию структуры в соответствии с изменяющимися термо-деформационными параметрами. Например, режим 2-2-1 (рисунок 3.23, в), реализованный на всех этапах с прокаткой в диапазоне температур 980...930 °С ($\alpha+\beta$ -область или ниже) и большом количестве проходов ($i_{\Sigma} = 14$), приводит к наиболее равномерному формированию макроструктуры по сечению и длине прутков на всех этапах. Однако, для заднего конца прутка конечного диаметра зафиксирован 3 балл зерна в осевой области, что можно объяснить технологией прокатки. Как отмечалось ранее, в эксперименте нагрев в печи и прокатка проводились без изменения направления прутка. Задняя стенка печи всегда имеет более высокую температуру, чем передняя в силу своего конструктива. Это, в совокупности с большим количеством промежуточных подогревов между проходами на третьем этапе привело к формированию осевой области с большим баллом зерна макроструктуры.

Базовый режим 2-1-1 (рисунок 3.23, г) реализован при температуре прокатки близкой к β -области (980...1000 °С), что в совокупности с высокими значениями $\mu = 1,5...2,0$ за проход ведет к росту балла макрозерна (см. величины между 1-ым и 2-ым этапом) и не обеспечивает полной проработки структуры. Аналогично этому, большая часть обжатия прутка по режиму 2-3-1 (рисунок 3.23, д) осуществлялась при температуре близкой к β -области или выше (980...1070 °С). В итоге суммарного обжатия в конце при $T_0 = 930$ °С оказалось недостаточно для измельчения макроструктуры.

Интересным также является сравнение режимов 3-1-1, 3-2-1 и 3-3*-1 (рисунок 3.23, е-ж), где РСП на 1-ом этапе начиналась с температуры ниже $T_{пп}$. Это, как и в случае прокатки в $\alpha+\beta$ -области обеспечило существенное дробление макроструктуры с 5 балла до 2-4 балла. На втором этапе наилучшую проработку удалось достигнуть для прутков при прокатке за 4 прохода с небольшими обжатиями (3-3*-1). Однако при этом формируется значительная анизотропия между передним и задним концами прутка. На последнем этапе только прокатка при температуре ниже $T_{пп}$ в последних проходах позволяет обеспечить проработку центральной области прутка.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать следующие основные выводы относительно формирования макроструктуры прутков из сплава ВТЗ-1 в процессе РСП:

- Деформация в двухфазной $\alpha+\beta$ -области (~960...980 °С) с коэффициентами вытяжки за проход 1,2...1,5 не позволяет получить 1 балл макроструктуры даже при больших суммарных обжатиях исходной заготовки;

- РСП при температуре, близкой к верхнему пределу $T_{пп}$ (~ 1000 °С) и коэффициентах вытяжки 1,5...2,0 за проход будет приводить к росту балла макрозерна по сечению прутка за счет дополнительного деформационного разогрева и окончания прокатки в β -области;

- Большое количество проходов $i_{\Sigma} = 10$ и более может приводить к росту осевой области прутка за счет преобладания процессов рекристаллизации и роста зерен во время промежуточных подогревов прутка;

- режимы РСП при низкой температуре (~ 930 °С) и высокой частоты вращения валков (~ 90 об/мин) показали положительные результаты с точки зрения проработки макроструктуры зерна. Скоростной режим прокатки может рассматриваться как эффективный способ управления температурным полем прутка.

Также рассмотрены общие тенденции эволюции типа микроструктуры сплава ВТЗ-1 для температурно-деформационных режимов. Для осевой зоны прутка (рисунок 3.24) наиболее существенные отличия в микроструктуре при различных температурах нагрева проявляются после достижения суммарного коэффициента вытяжки 4,8.

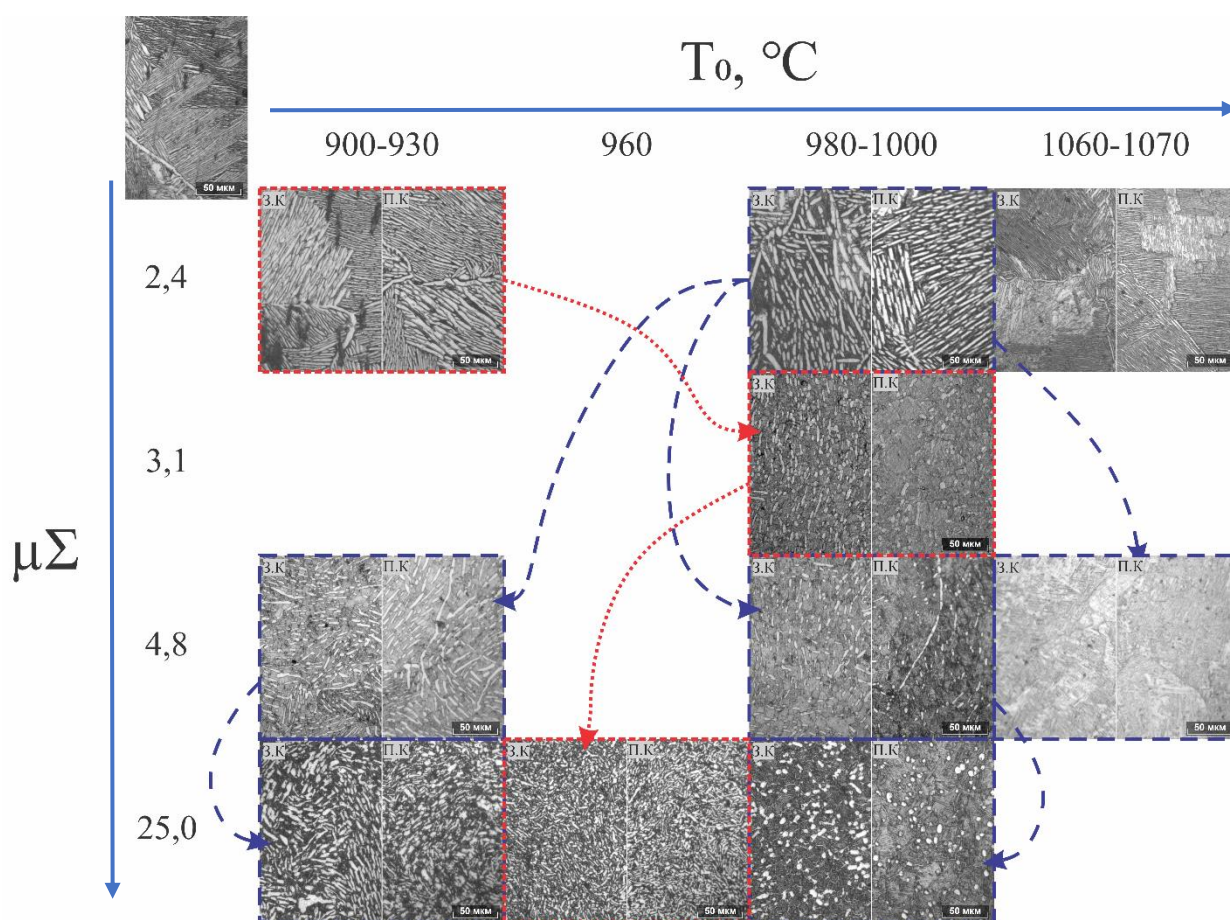


Рисунок 3.24 – Эволюция микроструктуры сплава ВТЗ-1 в центре поперечного сечения прутков, полученных при различных термо-деформационных режимах

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. Для конечных прутков микроструктура осевой области, подверженной РСП в диапазоне температур 900...960 °С, относится к переходному типу и состоит из смеси сильно фрагментированных равномерно распределенных α и β фаз. При температурах, близких к границе β -трансуса, получена глобулярная (бимодальная) микроструктура со сферическими зернами α -фазы и равноосными рекристаллизованными β -зернами.

Для области периферии прутка (рисунок 3.25) наблюдаются аналогичные закономерности преобразования микроструктуры в процессе деформации, с разницей в интенсивности проработки.

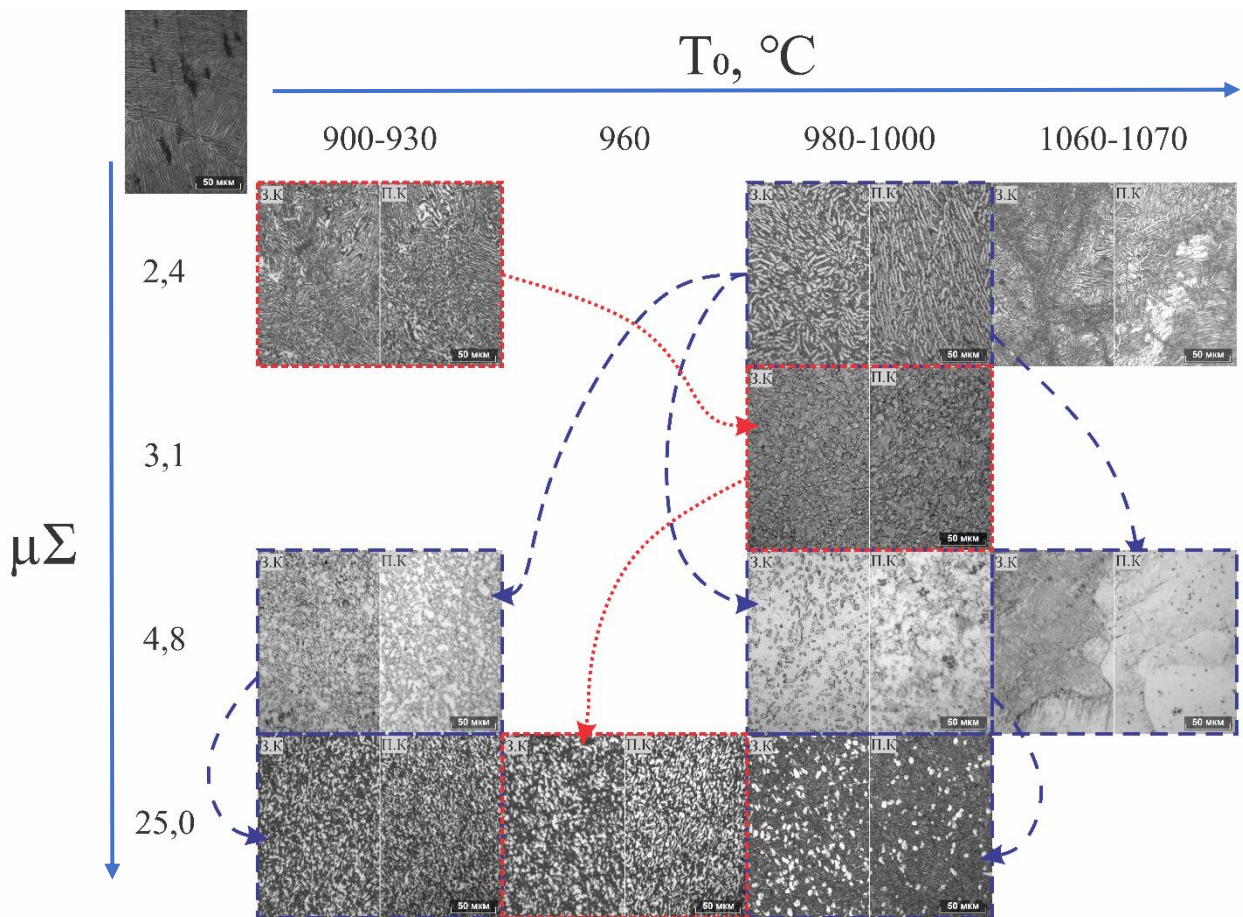


Рисунок 3.25 – Эволюция микроструктуры сплава ВТ3-1 на периферии поперечного сечения прутков, полученных при различных термо-деформационных режимах

Можно видеть, что 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.

3.2.5 Анализ нагрузок и скоростных параметров

К факторам, которые характеризуют процесс прокатки с точки зрения энергозатрат, производительности и эффективности использования ресурсов оборудования можно отнести уровень нагрузок и скоростные условия процесса. Косвенным образом скольжение на контакте с валками и нагрузка на главный привод показывает и влияние температурных изменений, происходящих во время прокатки. В данном разделе проводится анализ изменения токовых нагрузок и коэффициентов скольжения в очаге деформации, которые получены экспериментально в ходе проведения прокаток на станах РСП.

Для анализа выбраны наиболее показательные режимы, которые в большей степени отражают те или иные зависимости.

3.2.5.1. Анализ токовой нагрузки

Для анализа использованы данные токовой нагрузки на главный привод, зафиксированные в системе SCADA на установившейся стадии прокатки. По ним получены значения среднего тока на один из трех электродвигателей главного привода, а также изменение тока на установившейся стадии, рассчитанное как разница между током начала и конца установившейся стадии.

На 1 этапе эксперимента при температуре прокатки 900 °С можно видеть равномерное снижение токовой нагрузки при уменьшении диаметра проката с 87,7 до 67,6 мм и увеличении длины с 600 до 1000 мм. При этом средние температуры поверхности на входе и выходе были близки и находились в диапазоне 830...850 °С (рисунок 3.26, а), а разница токовой нагрузки не превышает 4...9 %. Это показывает, что для прутков диаметром более 50...60 мм и длине до 1000 мм внутреннего тепла заготовки достаточно, чтобы сохранить равномерность и стабильность температуры (при небольших коэффициентах вытяжки 1,1...1,2), а токовая нагрузка снижается пропорционально уменьшению диаметра заготовки.

При РСП прутков диаметром 42...23 мм при температуре 1000 °С и изменении длины с 788 до 2256 мм также происходит снижение значения среднего тока пропорционально уменьшению диаметру проката, однако разница ΔI , напротив, начинает возрастать от 12 до 19,4 % (рисунок 3.26, б).

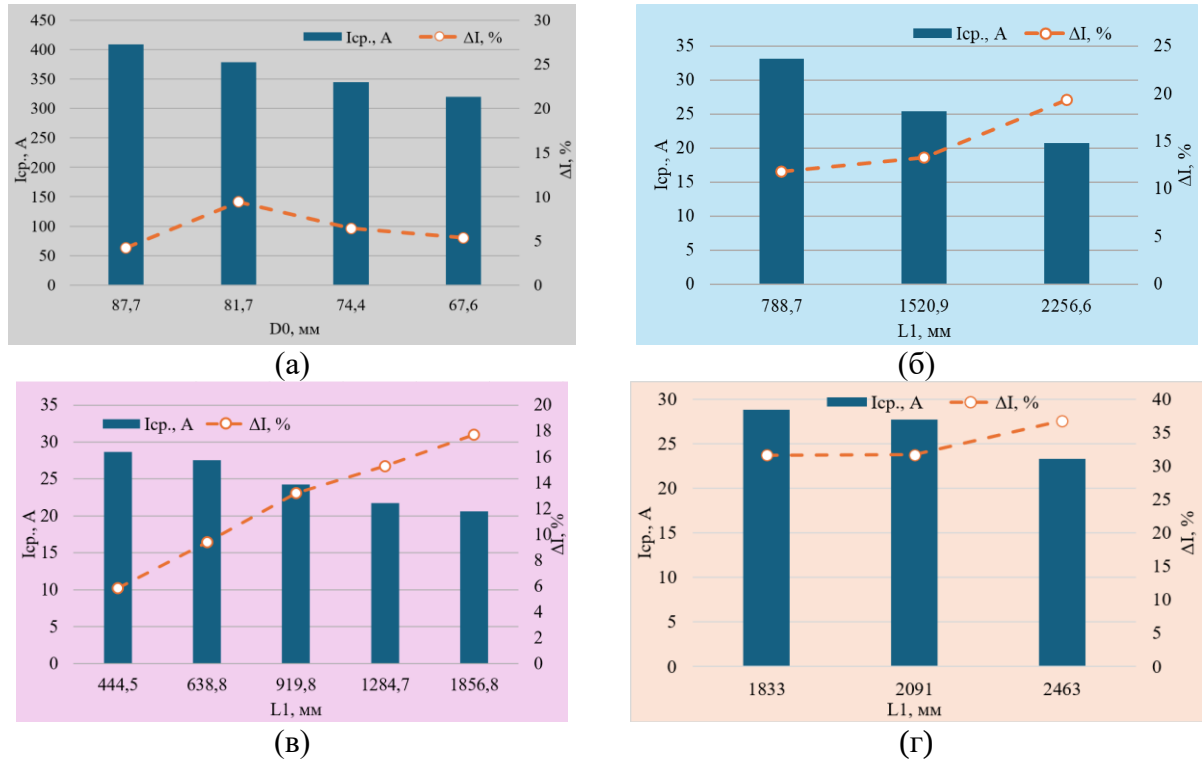


Рисунок 3.26 – Средняя токовая нагрузка I_{cp} и изменение тока ΔI при различных режимах прокатки: Стан 130Т, $T_0 = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 20\text{ мин}^{-1}$, $\mu = 1,1 \dots 1,2$ (а); Стан 14-40, $T_0 = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 60\text{ мин}^{-1}$, $\mu = 1,8/1,9/1,5$ (б); Стан 14-40, $T_0 = 960\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 60\text{ мин}^{-1}$, $\mu = 1,3 \dots 1,5$ (в); Стан 14-40, $T_0 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 30\text{ мин}^{-1}$, $\mu = 1,4/1,6/1,3$ (г)

Аналогичный характер получен для режима $T_0 = 960\text{ }^{\circ}\text{C}$ и росту длины прутка по проходам с 444 до 1857 мм. Изменение тока в данном случае практически линейно возрастает и достигает максимального значения 17,7 % для наибольшей длины и наименьшего диаметра (рисунок 3.26, в).

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 3.26, г, при температуре $930\text{ }^{\circ}\text{C}$, низкой частоты вращения валков $n = 30\text{ об/мин}$ 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 32...37 %. При этом интенсивность уменьшения средней токовой нагрузки снижается и составляет всего 6 А.

На основании экспериментальных данных получены зависимости токовых нагрузок при РСП сплава ВТЗ-1 по различным режимам, которые подтвердили значительное влияние неравномерности температурного поля прутка по длине на рост нагрузок на главный

привод. Наиболее значительным данный фактор является для прокатки прутков малого диаметра 10...40 мм и длиной свыше 1000 мм.

3.2.5.2. Анализ скоростных параметров

В рамках диссертационной работы проведено исследование влияния температуры прокатки и частоты вращения валков на скоростные параметры при РСП. На втором этапе прокатки получены прутки, прокатанные при различных температурах (режимы № 2-1, 2-2 и 2-3) и различных частотах вращения валков (режимы № 3-1, 2-2 и 3-2). Методика расчетов коэффициентов скольжения представлена в главе 2.

На рисунке 3.27 представлен внешний вид прокатанных прутков из сплава ВТЗ-1 с винтовым следом для различных режимов прокатки.

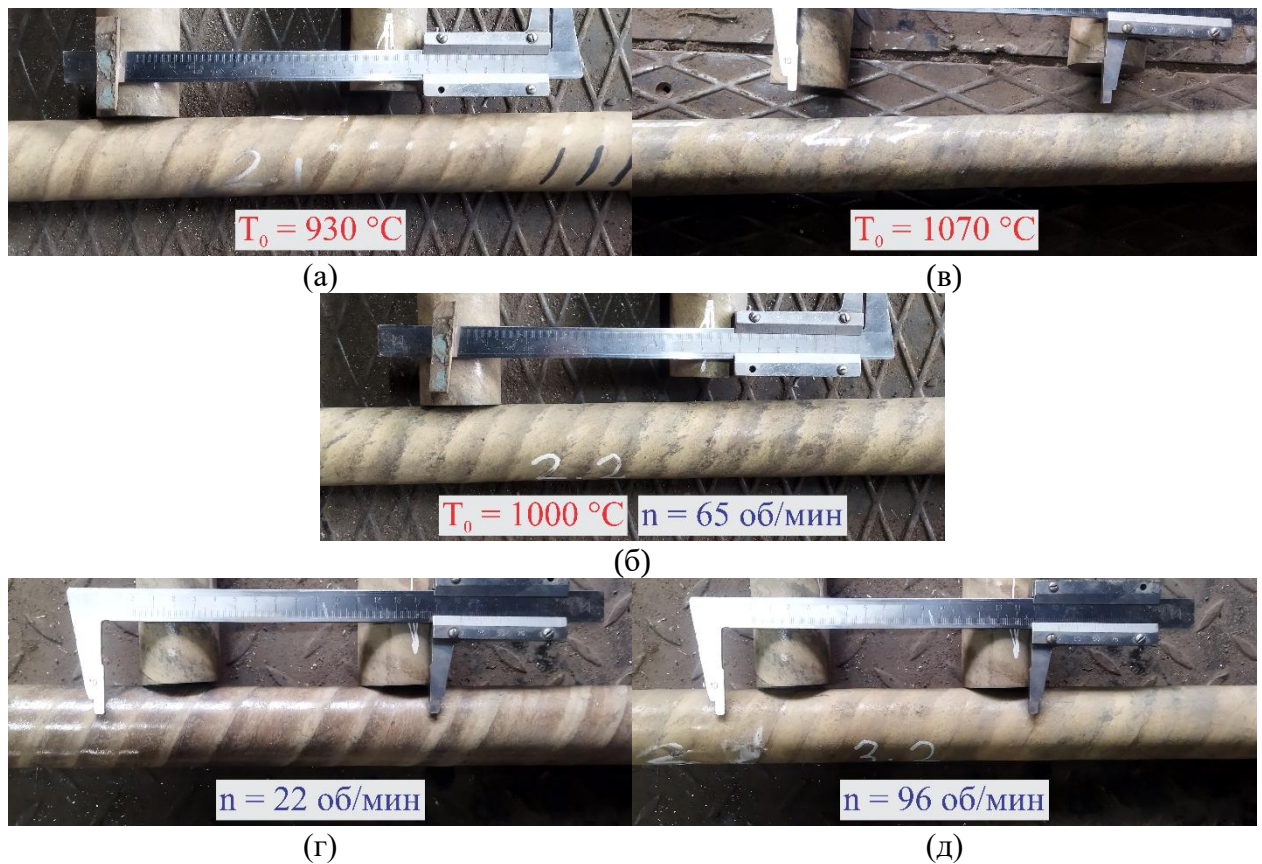


Рисунок 3.27 – Внешний вид прокатанных прутков из сплава ВТЗ-1 с винтовым следом для различных режимов прокатки при $T_0 = 930, 1000, 1070$ °C; $n = 65$ об/мин (а-в) и при $n = 22, 65, 96$ об/мин; $T_0 = 1000$ °C (г, б, д)

В таблице 3.4 представлены расчетные и экспериментальные данные скоростных и деформационных параметров при различных режимах РСП прутков из сплава ВТЗ-1. Для удобства анализа построены диаграммы коэффициентов осевой и тангенциальной скоростей в зависимости от варьируемого параметра (рисунок 3.28).

Таблица 3.4 – Расчетные и экспериментальные данные скоростных и деформационных параметров при различных температуре и частоте вращения валков

T_0 , °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_o	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 частоты вращения валков в исследуемом диапазоне от 22 до 96 об/мин (минимум и максимум для установленного привода стана) оказывает более существенное влияние на изменение коэффициентов осевой и тангенциальной скоростей, чем варьирование температуры нагрева заготовки. Так, повышение температуры прокатки с 930 до 1070 °C 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 $\eta_o > 1$, что говорит о возникновении осевого опережения в зоне выхода из очага деформации. С повышением скорости прокатки проскальзывание заготовки относительно валка 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_t с 0,76 до 0,65.

В целом, полученные значения коэффициентов осевой и тангенциальной скорости соотносятся с ранее полученными данными [111, 112]. В данном случае установлено, что радиально-сдвиговая прокатка прутков из сплава ВТЗ-1 при невысоких скоростях и температуре >1000 °C протекает без скольжения или с незначительным опережением в осевом направлении. В остальных случаях наблюдается осевое скольжение, достигающее максимума ~ 20 %, при максимальной частоте вращения валков 96 об/мин. В радиальном направлении процесс протекает со скольжением ~ 25...35 %, увеличиваясь с повышением скорости прокатки.

На величину скольжения влияют все факторы, которые в той или иной мере изменяют коэффициент трения, например форма рабочего инструмента, состояние его поверхности, химический состав и свойства прокатываемого металла, температура поверхности металла на контакте с валками и др. факторы [113].

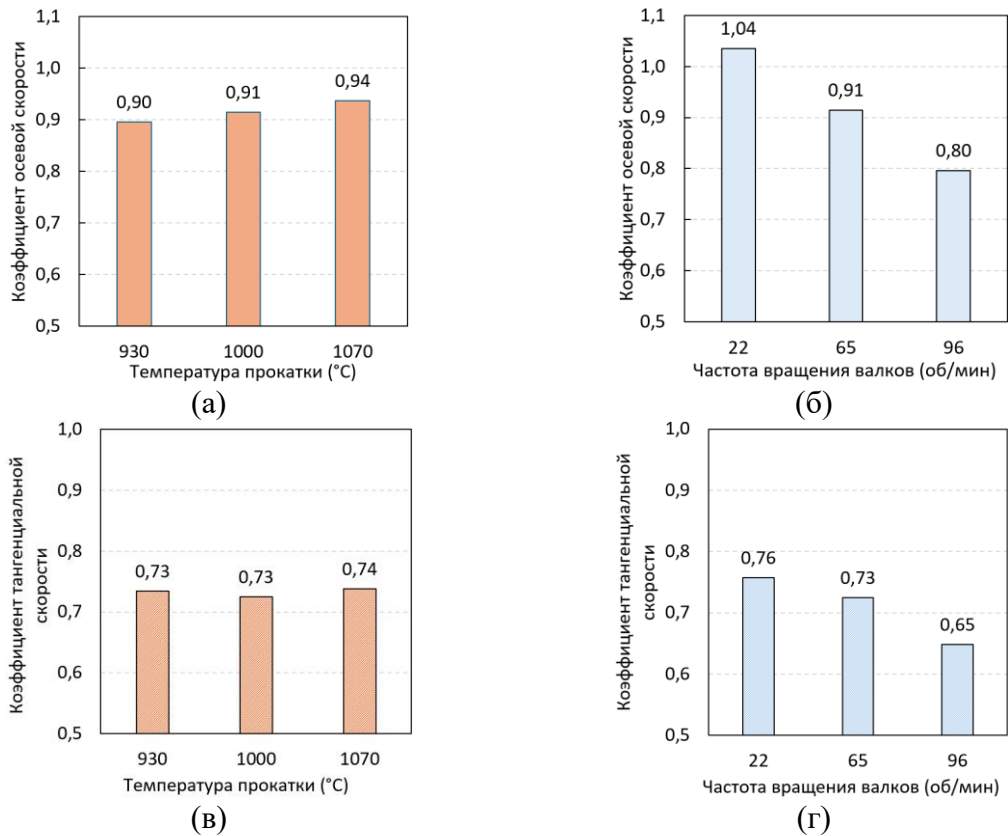


Рисунок 3.28 – Коэффициент осевой скорости η_o (а, б) и коэффициент тангенциальной скорости η_t (в, г) в зависимости от температуры прокатки (а, в) и частоты вращения валков (б, г)

На основе результатов проведённого анализа (п. 3.2.2) установлено, что тепловое состояние металла в процессе РСП, в частности, температура поверхности заготовки-прутка оказывают существенное влияние на кинематические и скоростные параметры процесса. Так снижение скольжения в осевом направлении при повышенной температуре можно объяснить с точки зрения изменения свойств материала. Сопротивление деформации титана при температуре выше $T_{пп}$ (β -область) существенно ниже, что при одинаковом обжатии приводит к большей радиальной деформации (уширению) и увеличению площади контактной поверхности. Это обеспечивает большой резерв тянущих сил и повышение коэффициента осевой скорости. Как утверждается в [113], увеличение коэффициента осевой скорости при росте температуры также можно связать с более интенсивным образованием слоя окалины на поверхности заготовки при нагреве.

Резкое увеличение скольжения в осевом и радиальном направлении при высокой частоте вращения валков (60...90 об/мин) по всей видимости связано со значительным изменением условий контактного трения на поверхности. Аналогичный характер влияния скорости отмечается в [111], однако влияние частоты вращения валков там не изучалось.

Значительная разница в окружной (в первую очередь) и в осевой скорости валка и скорости металла также подтверждается значительной величиной разогрева поверхности прутка при высокой частоте вращения валков (рисунок 3.11, а).

Особенность прокатки $\alpha+\beta$ титановых сплавов, обладающих полиморфным превращением, заключается в первоначальной деформации в β -области для проработки структуры и дробления макрозерна, и последующая прокатка в диапазоне температур, соответствующих $\alpha+\beta$ -области, что позволяет получить требуемую микроструктуру и механические свойства [41]. Полученные данные показывают, что необходим не только контроль и правильный подбор температурного режима и обжатий, но и учет скоростного режима прокатки.

Выводы по главе 3

Результаты анализа данных, полученных в ходе экспериментального исследования, позволили установить зависимость характера температурного поля поверхности заготовки/прутка на входе/выходе из ОД, а также эволюцию макро- и микроструктуры поперечного сечения прутков и зависимости токовых нагрузок при различных режимах РСП. Определен вклад температуры прокатки и частоты вращения валков в скоростные и кинематические параметры прокатки.

На основе вышеперечисленных результатов можно выделить следующие выводы:

1. При прокатке заготовок диаметром 95 мм с суммарным коэффициентом вытяжки 4,3 структура, получаемая в результате, 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 прутков сокращаются.

2. На основе многофакторного анализа результатов прокатки заготовок диаметром 61 мм при $\mu = 2,0$ установлено:

- повышение температуры прокатки снижает разницу между температурой на входе и выходе из валков, и уменьшает перепад температуры по длине прутка на выходе;

- увеличение частоты вращения валков увеличивает глубину проработки структуры и способствует уменьшению балльности зерна в осевой зоне;

- высокий коэффициент вытяжки обеспечивает более равномерное температурное поле за счет увеличения интенсивности деформационных процессов и тепловыделения;

- многопроходная прокатка обеспечивает лучшую проработку структуры по всему сечению прутка.

3. Анализ результатов третьего этапа показал, что:

- повышение температуры поверхности прутка на выходе из ОД определяется совокупным влиянием T_0 и μ (при $n = \text{const}$), увеличение μ при $T_0 = 930^\circ\text{C}$ приводит к росту $\Delta T_{\text{вых.-вх.}}$ за счет более интенсивного деформационного разогрева, увеличение температуры нагрева под прокатку до 1000°C способствует снижению вклада деформационного разогрева в прирост температуры поверхности прутка на выходе из ОД относительно входа, что проявляется более интенсивно для меньших диаметров заготовок;

- РСП за 5 проходов вместо 10 при температуре 960°C вместо 930°C приводит к более проработанной структуре и уменьшению занимаемой площади поперечного сечения с наибольшим баллом зерна;

- РСП прутков диаметром 42 мм длиной 400 мм за 5 проходов с $\mu_\Sigma = 5,0$ (2 прохода при T_0 , соответствующей верхней границе $\alpha+\beta$ -области с $\mu = 3,4$, и 3 прохода при $T_0 = T_{\text{пп}} - 30^\circ\text{C}$, $\mu = 1,5$) приводит к получению прутков длиной 1700 мм с равномерной по всему сечению и длине структурой прутка;

- повышение частоты вращения валков в рамках одного последнего прохода не оказывает существенного влияния на структурное состояние прутков, в то время как сохранение высокой частоты вращения валков на протяжении трех завершающих проходов способствует формированию более равномерной структуры.

4. Результаты анализа эволюции макроструктуры прутков из сплава ВТЗ-1 показали следующее:

- РСП с малыми μ при температурах, соответствующих двухфазной $\alpha+\beta$ -области, не приводит к получению макроструктуры 1-го балла в осевой зоне прутка. Аналогичный эффект наблюдается при $\mu = 1,5 \dots 2,0$ за проход и T_0 , близкой к верхнему пределу $T_{\text{пп}}$;

- повышение количества проходов до 10 и более может приводить к росту балла зерна в осевой области прутка за счет преобладания процессов рекристаллизации и роста зерна при подогревах;

- РСП при низкой температуре и высокой скорости прокатки показала положительные результаты для уменьшения балла зерна макроструктуры.

5. В рамках исследуемых параметров прокатки наблюдается корреляционная зависимость между условиями скольжения в ОД и температурно-скоростными параметрами прокатки: прямая – для температуры прокатки и обратная – для скорости. Совокупность анализа нагрузок и условий скольжения в очаге деформации подтверждают актуальность исследования и совершенствования термо-деформационных режимов РСП для $\alpha+\beta$ титановых сплавов, а также поиск решений для управления температурным режимом РСП прутков малого диаметра при длине более 1000 мм.

ГЛАВА 4. КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1. Создание модели

Моделирование процесса РСП методом конечных элементов было проведено в программном комплексе QForm 3D v11.x, модели валков и заготовки были созданы при помощи САД-системы SolidWorks3D [109]. Расположение валков и заготовки показано на рисунке 4.1, а. Геометрия заготовки и инструмента полностью соответствовали параметрам эксперимента. Для сокращения времени моделирования валки были выполнены полыми. Инструмент задан как абсолютно жесткое тело и заготовка задана как пластическое тело.

Для сравнения с экспериментальными данными зафиксированы значения температуры поверхности прутка в соответствии с положением ИК-пирометров в ходе экспериментальной прокатки в каждом этапе прокатки. Для модели 1-го этапа контрольные точки определены на расстоянии 120 мм от пережима с обеих сторон очага деформации (точки P0 и P1 на рисунке 4.1, б) [109].

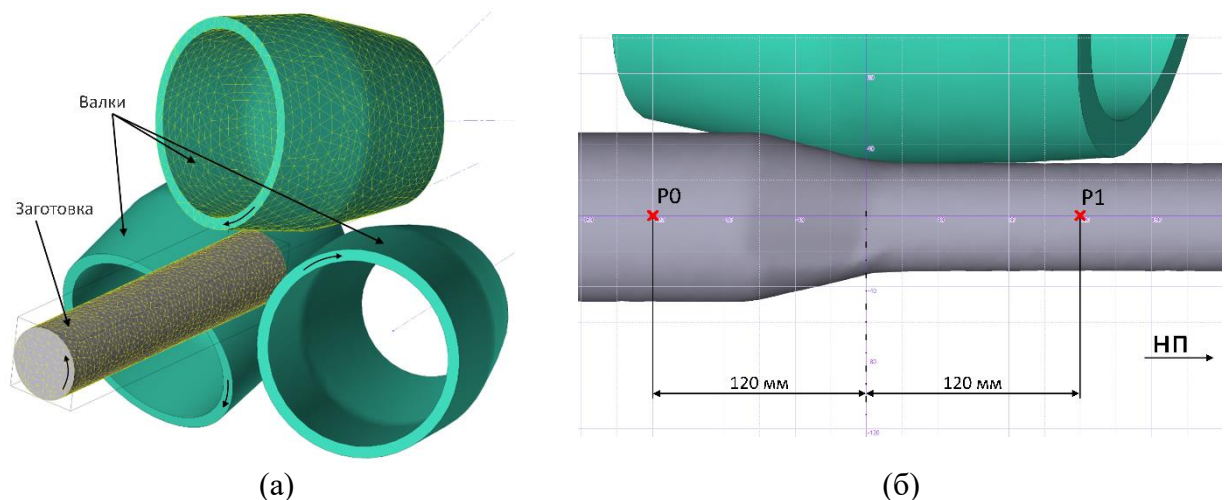
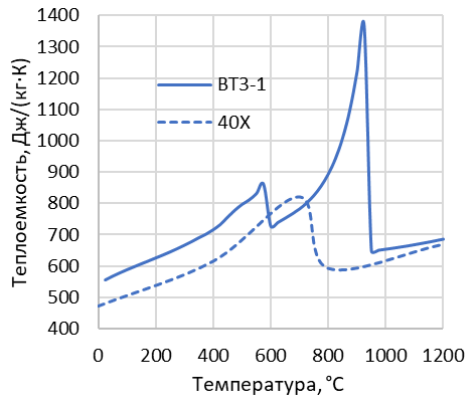
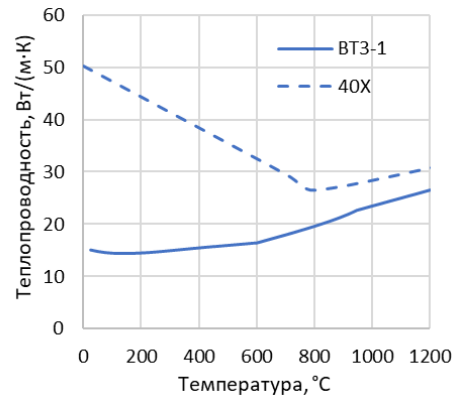


Рисунок 4.1 – 3D сборка очага деформации с расположением валков и заготовки (а); точки фиксации температуры (б) [109]

Точность расчета при моделировании существенно зависит от полноты исходных данных, использованных в модели. Для повышения точности определения температурного поля прутка теплоемкость и теплопроводность сплава ВТЗ-1 и стали 40Х (материал валков) была задана в виде табличной функции в диапазоне температур 25...1200 °С (Рисунок 4.2).



(а)



(б)

Рисунок 4.2 – Термофизические свойства сплава ВТЗ-1 и стали 40Х в зависимости от температуры: теплоемкость (а); теплопроводность (б) [109, 114]

Для учета теплообмена при контакте инструмента и заготовки применяется уравнение нестационарной теплопроводности (4.1):

$$k(\Delta T) + q_G = \rho c \dot{T} \quad (4.1)$$

где k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

T – температурное поле, К;

q_G – мощность внутреннего источника теплоты, Вт/м³;

Δ – оператор Лапласа;

ρ – плотность, кг/м³;

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Конвективный теплообмен заготовки с воздухом описывается законом Ньютона-Рихмана (4.2):

$$q_n = h(T_1 - T_c), \quad (4.2)$$

где h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

T_1 – температура заготовки;

T_c – температура окружающей среды.

Для описания теплообмена излучением используется следующая формула (4.3):

$$q_n = \varepsilon \sigma_0 (T_1^4 - T_c^4) \quad (4.3)$$

где ε – степень черноты реального тела, которая определяется как отношение излучательных способностей данного тела и абсолютного черного тела при той температуре;

$\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана – Больцмана.

Преобразование энергии деформации в теплоту можно определить по формуле (4.4):

$$q_p = 0,95\bar{\sigma}\dot{\epsilon}, \quad (4.4)$$

где $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений, МПа;

$\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, с^{-1} .

Расчет напряжений и деформаций материала производится на основании реологических свойств материала заготовки. Напряжение течения σ_s зависит от температуры деформации T , скорости деформации $\dot{\epsilon}$ и степени деформации ϵ и могут быть описаны функцией вида (4.5):

$$\sigma_s = f(T, \dot{\epsilon}, \epsilon). \quad (4.5)$$

Для исследуемого сплава значения σ_s заданы при скоростях деформации 0,01, 1 и 10 1/с и температурах 900, 1000 и 1100 °С (рисунок 4.3).

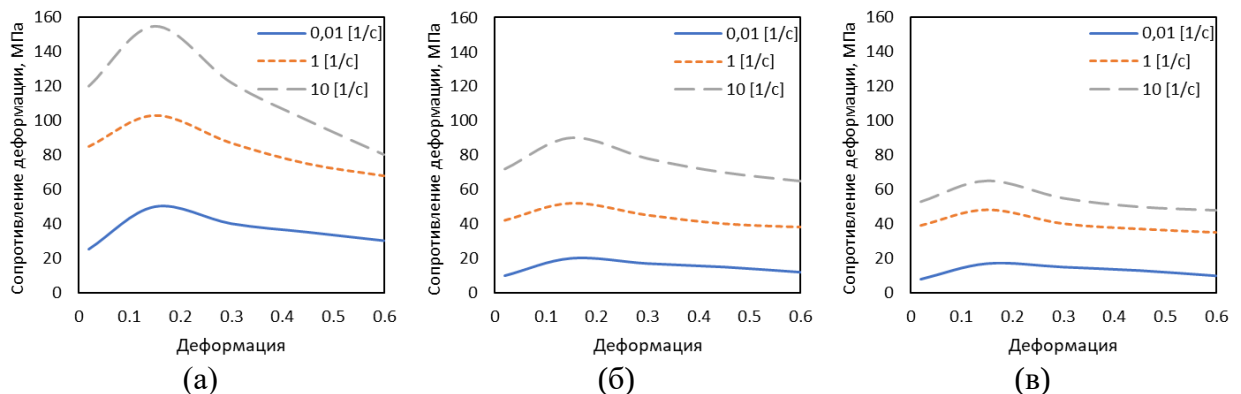


Рисунок 4.3 – Сопротивление деформации сплава ВТ3-1 при различных скоростях деформации и температурах: 900 °С (а); 1000 °С (б); 1100 °С (в) [109]

Расчет накопленной степени деформации $\bar{\epsilon}^p$ в программе QForm производится по формуле (4.6):

$$\bar{\epsilon}^p = \sum_n \dot{\epsilon}^n \Delta t_n, \quad (4.6)$$

где $\dot{\epsilon}$ – эквивалентная деформация;

n – номер шага расчета;

Δt_n – время расчёта шага.

Условия трения были смоделированы в соответствии с законом Зибеля, согласно которому удельная сила трения пропорциональна максимальному касательному напряжению при сдвиге k с коэффициентом пропорциональности, называемым фактором трения m (4.7):

$$\tau = m \cdot k \quad (4.7)$$

Учитывая, что трение в первую очередь определяет время деформации и контактное скольжение, в моделировании фактор трения выбирался исходя из соответствия экспериментального времени прокатки и времени прокатки при проведении расчетов.

Для более точного расчета параметров моделирования в очаге деформации задаются параметры адаптации сетки конечных элементов. Параметр «Множитель адаптации» показывает во сколько раз нужно уменьшить максимальный расчетный размер конечного элемента для определения максимального размера элемента при создании сетки КЭ. Дополнительно уменьшить максимальный размер конечного элемента позволяет параметр «Минимальная адаптация». Используемые для создания модели основные параметры указаны в таблице 4.1. Параметры, значения которых изменяются при различных режимах прокатки, обозначены как *var*.

Таблица 4.1 – Основные параметры КЭ-модели [109]

Параметр	Значение
Температура заготовки, °С	<i>var</i>
<i>Параметры инструмента</i>	
Материал рабочих валков	40X
Диаметр валка в пережиме, мм	В соответствии с калибровкой валка стана
Угол подачи, град	В соответствии со станом
Угол раскатки, град	
Частота вращения валков, об/мин	<i>var</i>
Температура инструментов, °С	25
<i>Параметры окружающей среды</i>	
Температура окружающей среды, °С	25
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К	30
Степень черноты	0,6
<i>Параметры сетки конечных элементов</i>	
Min/max адаптация сетки заготовки	1,5/15
Min/max адаптация сетки инструментов	1/20
Шаг расчета по времени	0,005

4.2. Верификация модели

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 измерения фактических размеров прутков после окончания эксперимента. Для разработки цифровой модели РСП установлена максимальная относительная погрешность до 10 %.

4.2.1 Время прокатки

В таблице 4.2 представлены данные, зафиксированные в процессе эксперимента и по результатам симуляции процесса прокатки. Для коротких и длинных заготовок время прокатки может отличаться в несколько раз, поэтому в данном случае имеет смысл проводить сравнение не только по относительной разнице, но и по абсолютной.

Таблица 4.2 – Сравнение временных параметров прокатки при моделировании и эксперименте [109]

№ этапа	№ режима	i	$\tau_{\text{эксп.}}, \text{с}$	$\tau_{\text{симул.}}, \text{с}$	$\Delta\tau_{\text{абс.}}, \text{с}$	$\Delta\tau_{\text{отн.}}, \%$
Этап №1	1	1	17,35	17,68	0,32	1,84
	2	1	11,40	11,37	0,03	0,00
		2	11,70	11,58	0,12	1,04
		3	15,40	16,17	0,76	4,73
	3	1	9,30	9,34	0,04	0,43
		2	9,80	9,86	0,05	0,56
		3	11,30	11,59	0,29	2,46
		4	12,80	13,11	0,31	2,36
		5	15,60	16,01	0,40	2,53
	2-2	1	3,30	3,49	0,18	5,28
	2-1	1	3,38	3,28	0,11	3,33
Этап №2	2-3	1	3,14	3,19	0,04	1,35
	3-1	1	8,21	8,68	0,47	5,39
	3-2	1	2,59	2,37	0,21	8,93
	3-3	1	1,95	1,92	0,03	1,61
	3-3*	2	...	...	...	
		3	2,60	2,54	0,06	2,56
		4	2,41	2,47	0,05	2,15
	1-2	1	7,11	7,34	0,23	3,14
	1-1	1	2,00	1,91	0,10	4,99

Максимальная абсолютная разность по времени прокатки составляет 0,76 с для режима № 2 первого этапа прокатки в последнем проходе, при времени прокатки ~15...16 с [109]. Относительное отклонение времени прокатки при моделировании от экспериментальных данных для данного случая не превышает 4,73 %.

Для всех остальных вариантов первого этапа относительная ошибка не превышает 2,5 %. Стоит отметить, что при моделировании многопроходной прокатки может накапливаться ошибка по длине прутка, что также может влиять на время. Поэтому данные параметры должны рассматриваться в совокупности.

Для этапа № 2 эксперимента максимальная абсолютная разность времени прокатки составила 0,5 с для режима № 3-1, при котором прокатка осуществлялась с низкой скоростью, что относительно полного времени прокатки 8,7 с составляет 5,7 %. Это значение адекватно для такого порядка длительности процесса. Максимальное относительное отклонение зафиксировано на уровне 8,3 % для режима № 3-2 с высокой скоростью прокатки, при этом абсолютное отклонение составило 0,2 с.

Отклонения времени прокатки в моделировании от экспериментальных данных могут быть обусловлены настройками модели, в частности величиной шага по времени расчета, переразбиением сетки в процессе расчета, стабильностью параметров трения (или скольжения), а также допустимой ошибкой в полученной длине прутка после прокатки. Эти факторы влияют на точность совпадения расчетных и экспериментальных результатов.

4.2.2 Геометрические размеры и формоизменение прутка

Одним из отличительных признаков прутков, прокатанных на станах винтовой прокатки, является наличие концевых утяжек, представляющих собой углубления неправильной формы на торцах. В процессе верификации цифровой модели было проведено сравнение их размеров и формы для прутков, полученных по экспериментальным режимам. На рисунке 4.4 представлены формы утяжек прутков, полученных в экспериментах и при моделировании первого этапа прокатки. Для второго этапа прокатки сравнение представлено в **приложении Б**.

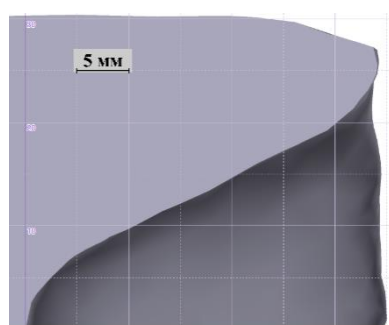
В таблице 4.3 представлены результаты сравнения измерения глубины утяжек прутков, полученных в ходе экспериментальной прокатки и моделирования на первом и втором этапах.

Глубина утяжек, полученных при моделировании первого этапа, составила 35 и 40 мм после РСП при температуре 1060 и 980 °С, соответственно. Измеренные в ходе эксперимента значения отличаются незначительно: 34,2 мм для режима № 1 и 41,6 мм для режима № 2, при этом относительное отклонение не повышает 4 %, что соответствует критериям оценки адекватности цифровой модели. Наблюдается выраженное визуальное сходство формы и кривизны утяжек, что говорит о корректности формоизменения заготовки в разработанной модели.

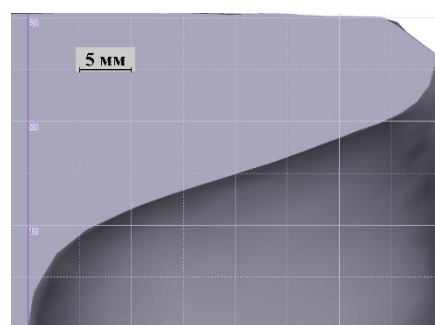
По результатам второго этапа, относительная разница глубины утяжек не превышает 10 % для всех исследуемых режимов.

Таблица 4.3 – Сравнение глубины утяжек П.К. прутка в моделировании и эксперименте

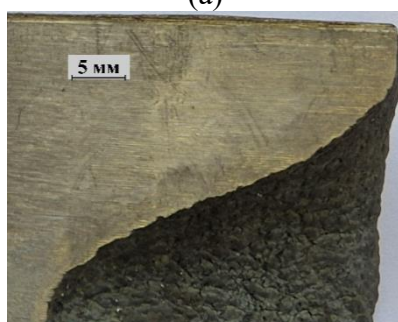
№ этапа	№ режима	$\Gamma_{\text{эксп.}}, \text{ мм}$	$\Gamma_{\text{симул.}}, \text{ мм}$	$\Delta\Gamma_{\text{абс.}}, \text{ мм}$	$\Delta\Gamma_{\text{отн.}}, \%$
Этап №1	1	34,2	35,0	0,8	2,3
	2	41,6	40,0	1,6	4,0
	3	...	...	...	...
Этап №2	2-2	24,9	26,5	1,6	6,0
	2-1	21,3	23,0	1,7	7,4
	2-3	16,4	16,3	0,1	0,6
	3-1	20,0	19,2	0,8	4,2
	3-2	22,0	24,4	2,4	9,8
	3-3	9,2	9,8	0,6	6,1
	3-3*	13	14,0	1,0	7,1
	1-2	20,1	20,0	0,1	0,5
	1-1	21,7	24,0	2,3	9,6



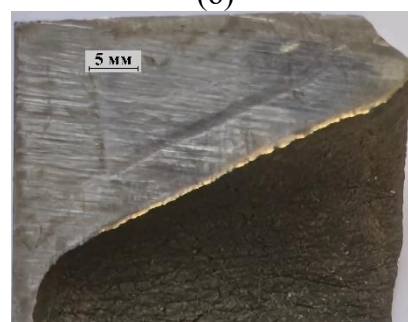
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 4.4 – Внешний вид утяжки переднего торца прутка после прокатки в моделировании (а, б); и эксперименте (в, г) [109]

В таблице 4.4 представлены значения среднего диаметра прутка для переднего конца (П.К.) и заднего конца (З.К.) прутков, полученных по всем режимам первого и второго этапов эксперимента. Значение среднего диаметра после экспериментальной прокатки первого этапа варьируется от 60,01 до 60,57 мм, при этом разница между передним и задним концом прутков составляет от 0,12 до 0,37 мм. Для моделирования данный показатель находится в диапазоне от 60,35 мм до 61,02 мм, а абсолютная разница диаметров концов прутков достигает 0,17 мм. В относительных величинах отклонение данных моделирования от экспериментальных составляет не более 1 % [109].

Данные о диаметрах прутков, полученные в результате моделирования второго этапа прокатки, отличаются от экспериментальных не более чем на 2 %, что свидетельствует о высокой точности цифровой модели при анализе геометрических характеристик прутков, полученных в условиях исследуемых режимов прокатки.

Овальность прутков при моделировании первого этапа прокатки не превышает 0,25 %, и для экспериментальных прутков составляет не более 0,65 %. Аналогично для второго этапа не более 1,2 % и 2,3 % соответственно. В модели инструмент использован как абсолютно жесткое тело. Это означает, что полученные значения отклонения от номинального диаметра и овальность может быть вызвана только несовершенствами геометрии сетки, профилем валка или допустимой неточностью настройки параметров прокатки. Для экспериментальных прутков овальность имеет близкие значения при всех режимах прокатки, что свидетельствует о том, что геометрическая точность не зависит от температуры и режима обжатий, а определяется лишь калибровкой валка и жесткостью прокатного стана.

Таблица 4.4 – Диаметры и овальность прутков полученных при моделировании и эксперименте

№ этапа	№ режима	D _{эксп.} , мм			D _{симул.} , мм		ΔD _{абс.} , мм		ΔD _{отн.} , %		a _{эксп.} , %		a _{симул.} , %	
		П.К.	З.К.	Δ _{п.к.-з.к.} (%)	П.К.	З.К.	П.К.	З.К.	П.К.	З.К.	П.К.	З.К.	П.К.	З.К.
Этап №1	1	60,32	60,01	0,51	60,35	60,52	0,03	0,51	0,05	0,84	0,51	0,45	0,26	0,03
	2	60,57	60,20	0,61	61,02	60,89	0,45	0,69	0,74	1,13	0,41	0,57	0,23	0,22
	3	60,27	60,39	-0,20	60,76	60,80	0,49	0,41	0,81	0,67	0,63	0,61	0,07	0,12
Этап №2	2-2	43,29	42,63	1,52	42,46	42,15	0,83	0,48	1,95	1,14	0,28	0,23	0,07	0,04
	2-1	42,04	41,98	0,14	41,99	42,05	0,05	0,07	0,12	0,17	0,57	0,43	0,15	0,06
	2-3	42,65	42,47	0,42	42,48	42,22	0,17	0,25	0,40	0,59	0,68	0,42	1,15	0,32
	3-1	42,41	42,10	0,73	41,75	41,73	0,66	0,37	1,58	0,89	0,59	1,12	0,15	0,10
	3-2	42,08	41,73	0,83	41,86	41,85	0,22	0,12	0,53	0,29	0,36	0,53	0,15	0,12
	3-3	53,50	53,61	-0,21	54,12	53,77	0,62	0,16	1,15	0,30	1,14	0,39	0,03	0,16
	3-3*	42,06	42,00	0,14	42,27	42,19	0,21	0,19	0,50	0,45	0,48	0,36	0,29	0,10
	1-2	42,31	42,04	0,64	42,19	42,06	0,12	0,02	0,28	0,05	0,31	0,17	0,71	0,26
	1-1	42,47	42,03	1,04	42,34	42,24	0,13	0,21	0,31	0,50	2,26	0,67	0,11	0,76

Результаты измерения длины прутков после каждого прохода во время эксперимента и в моделировании первого и второго этапа прокатки приведены в таблице 4.5. Наибольшее отклонение конечной длины от экспериментальных данных наблюдается при моделировании РСП первого этапа за 5 проходов и достигает 6,3 %, что может быть обусловлено накоплением ошибок при расчетах многопроходной прокатки [109].

Полученные данные второго этапа прокатки свидетельствуют о высокой точности разработанной модели. Относительные отклонения, составляющие 3,1 % и 3,3 % для режимов № 2-3 и 3-1, соответственно, объясняют расхождения во времени прокатки,

выявленные при сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными. Эти показатели подтверждают адекватность модели и её способность точно воспроизводить временные характеристики процесса прокатки и формоизменение заготовки для исследуемых режимов.

Таблица 4.5 – Сравнение длины прутка в моделировании и эксперименте [109]

№ этапа	№ режима	№ прохода	$L_{\text{эксп.}}, \text{ мм}$	$L_{\text{симул.}}, \text{ мм}$	$\Delta L_{\text{абс.}}, \text{ мм}$	$\Delta L_{\text{отн.}}, \%$
Этап №1	1	1	1105,0	1071,7	33,4	3,1
	2	1	592,0	614,0	22,0	3,6
		2	731,2	764,0	32,8	4,3
		3	1063,0	1058,5	4,5	0,4
	3	1	492,8	508,0	15,2	3,0
		2	567,9	594,0	26,1	4,4
		3	684,8	720,0	35,2	4,9
		4	829,5	885,0	55,5	6,3
		5	1042,0	1090,3	48,3	4,4
Этап №2	2-2	1	635	644,5	9,5	1,5
	2-1	1	664	677	13,0	1,9
	2-3	1	627,5	647,9	20,4	3,1
	3-1	1	620	640,9	20,9	3,3
	3-2	1	651	640,6	10,4	1,6
	3-3	1	383	386,8	3,8	1,0
	3-3*	4	576	560,3	15,7	2,8
	1-2	1	1720	1728	8,0	0,5
	1-1	1	315	315,2	0,2	0,1

4.2.3. Температура поверхности заготовки/прутка

В таблице 4.6 приведены значения средней температуры поверхности прутка на выходе в каждом проходе прокатки первого и второго этапа прокатки, зафиксированные экспериментально, и соответствующие им данные моделирования, а также значения относительной ошибки. Для всех проходов первого этапа прокатки ошибка по средней температуре не превышает 1 % [109].

Для второго этапа прокатки максимальное абсолютное отклонение составило 16,7 °С для режима № 2-3, при высокой температуре прокатки, при этом среднее значение температуры поверхности прутка в эксперименте составило 1012,6 °С, а в моделировании – 1029,3 °С, что соответствует относительному отклонению в 1,6 %. Такие результаты свидетельствуют о высокой степени совпадения моделируемых и экспериментальных данных, подтверждая достоверность применяемой модели для анализа температурного режима прокатки.

Результаты сравнения данных моделирования с экспериментальными для третьего этапа прокатки представлены в приложении Б.

Таблица 4.6 – Сравнение температуры поверхности прутка на выходе из ОД при моделировании и эксперименте [109]

№ этапа	№ режима	№ прохода	T _{эксп.} , °C	T _{симул.} , °C	ΔT _{абс.} , °C	ΔT _{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

Таким образом, полученная модель по всем выбранным критериям сравнения показывает высокую сходимость с экспериментальными данными. Значения относительных ошибок для всех параметров находятся в пределах допустимой погрешности, что свидетельствует о корректной работе цифровой модели.

4.3. Многофакторный компьютерный эксперимент и определение влияния режимов РСП на температурно-деформационные параметры

4.3.1. Влияние длины заготовки и прутка

Для учёта совместного влияния температуры прокатки, частоты вращения валков и длины заготовки на формирование температурного поля заготовки, в том числе его равномерности в поперечном сечении и по длине прутка (между п.к. и з.к.), было проведено полнофакторное моделирование процесса РСП, охватывающее 36 режимов прокатки с варьированием указанных параметров.

Симуляция выполнялась в программном комплексе QForm на основе калибровки министана 14-40: заготовка диаметром 30 мм прокатывалась с коэффициентом вытяжки $\mu = 1,7$. Значения варьируемых параметров: $T_0 = 940, 1000, 1060$ °C; $n = 30, 60, 90, 120$ об/мин; $L_0 = 500, 1000, 1500$ мм.

Результаты проведённого анализа температурных характеристик представлены на рисунке 4.5. На основании результатов получены графики абсолютного изменения средней температуры прутка относительно исходной температуры нагрева ($\Delta T = T_0 - T_{\text{ср.}}$), абсолютной разницы температуры поверхности прутка между П.К. и З.К. ($T_{\text{п.к.}} - T_{\text{з.к.}}$) и абсолютной разницы температур между точками на оси прутка и на поверхности ($T_{\text{ц.}} - T_{\text{р.}}$).

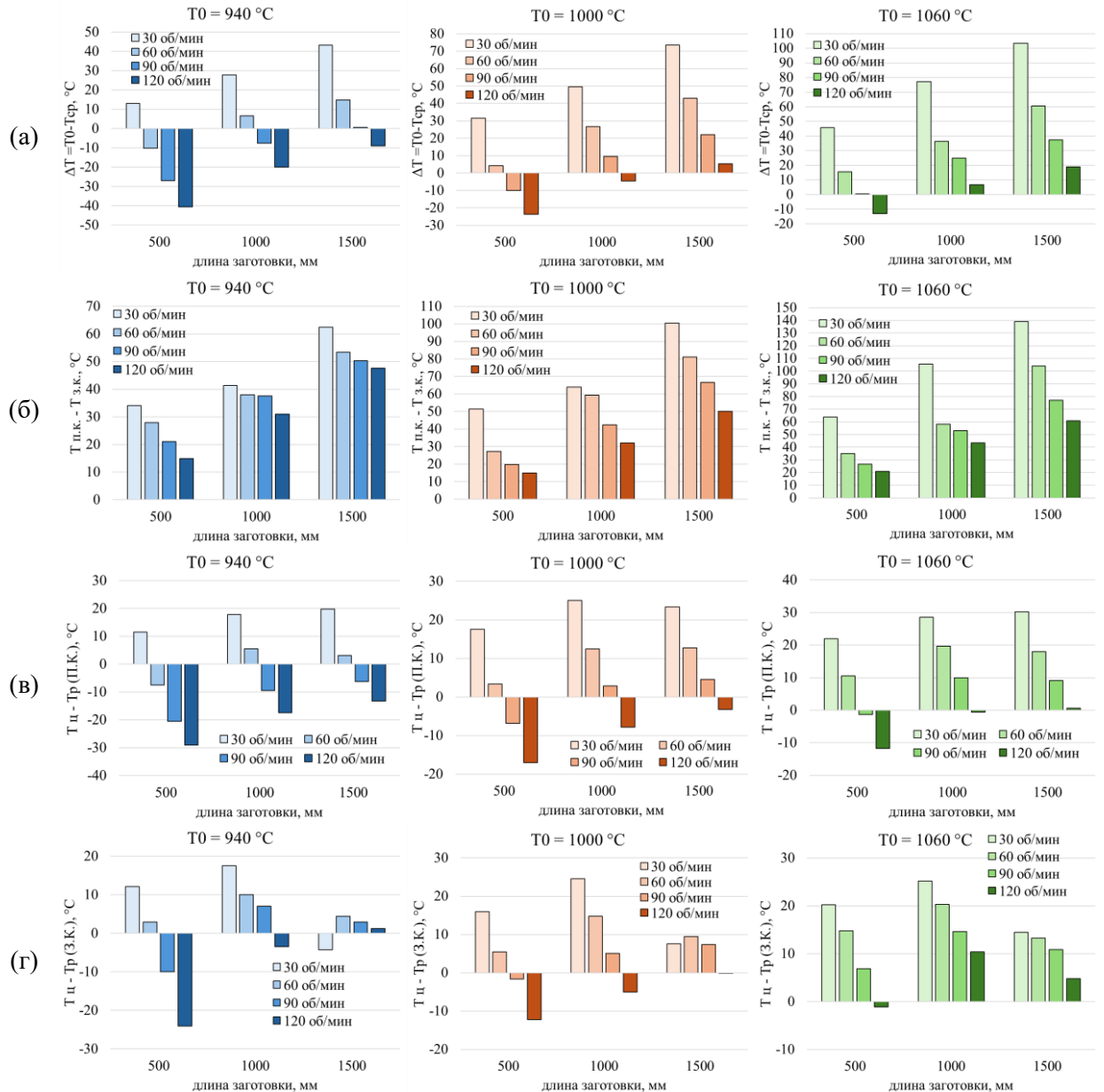


Рисунок 4.5 – Изменение средней температуры прутка относительно температуры прокатки (а), разница температур переднего и заднего концов прутка (б) и разница температур центра и поверхности для переднего и заднего концов прутка (в, г)

Во всех режимах наблюдается прямая зависимость изменения температуры прутка по сравнению с температурой прокатки (ΔT) и равномерности температуры вдоль его оси ($T_{\text{п.к.}} - T_{\text{з.к.}}$) от длины заготовки.

Полученная разница $T_{п.к.} - T_{з.к.}$ (рисунок 4.5, б) связана с увеличением времени достижения заднего конца заготовки ОД, что приводит к прокатке заднего конца при более низкой температуре по сравнению с передним, уменьшая общую среднюю температуру поверхности полученного прутка и, соответственно, увеличивая ΔT (рисунок 4.5, а).

При этом интенсивность изменения значения $(T_{п.к.} - T_{з.к.})$ при увеличении L_0 (от 500 до 1500 мм) возрастает с повышением температуры прокатки: при $T_0 = 940\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{п.к.} - T_{з.к.}$ увеличивается на 28...32 $^{\circ}\text{C}$, а при $T_0 = 1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на 40...75 $^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4.5, б).

Изменение длины заготовки оказывает более сложное влияние на равномерность температуры поперечного сечения заднего конца полученного прутка (рисунок 4.5, г). Во всех вариантах значений исследуемых параметров разница между температурой осевой зоны и поверхности прутка $(T_{ц} - T_{р(З.К.)})$ возрастает при увеличении длины заготовки до 1000 мм по сравнению с $L_0 = 500$ мм. Дальнейшее увеличение L_0 до 1500 мм приводит к обратному эффекту, т.е. значение $T_{ц} - T_{р}$ уменьшается в абсолютном выражении. Это влияние объясняется соотношением температур прутка и валков во время входа заднего конца прутка в ОД. При $L_0 = 500$ мм температура поверхности прутка ниже осевой зоны за счёт большей скорости охлаждения на воздухе до достижения зоны деформации и охлаждения при контакте с валками. При $L_0 = 1000$ мм время охлаждения на воздухе за время прокатки увеличивается, повышая разницу $T_{ц} - T_{р}$ на З.К., в то же время температура валков при большем времени контакта с горячей заготовкой повышается, уменьшая интенсивность охлаждения поверхности прутка при контакте, однако значение $T_{ц} - T_{р}$ остаётся выше, чем при $L_0 = 500$ мм. Более длительное охлаждение на воздухе ($L_0 = 1500$ мм) приводит к ускоренному охлаждению осевой зоны за счёт внутреннего теплообмена с поверхностными слоями металла заготовки, уменьшая разницу между поверхностью и осевой зоной металла заднего конца заготовки до достижения ОД. Кроме того, в этом случае температура инструмента увеличивается больше, что приводит к меньшему охлаждению при контакте заготовка/валок.

4.3.2. Влияние скорости прокатки

Изменение частоты вращения валков оказывает значительное влияние на все исследуемые характеристики температурного поля прутка, при этом наблюдается их отрицательная корреляция (рисунок 4.5).

Увеличение n приводит к уменьшению значения ΔT (рисунок 4.5, 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 (меньшие теплообмен заготовка/валок) и сокращением машинного времени прокатки. Всё это в сочетании с дополнительным разогревом за счёт 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).

По сравнению со случаем $n = 30$ об/мин, повышение частоты вращения валков до 120 об/мин увеличивает $T_{\text{ср.вых.}}$ на 48...54 °С при $T_0 = 940$ °С, на 54...68 °С при $T_0 = 1000$ °С и на 59...84 °С при $T_0 = 1060$ °С.

Повышение скорости прокатки приводит к снижению неравномерности температуры между П.К. и З.К. в несколько раз для всех исследуемых температур.

Как показано на рисунках 4.5, в и г, температура поверхности прутка на обоих его концах увеличивается с повышением частоты вращения валков по сравнению с температурой осевой зоны соответствующего конца. Это связано с теми же причинами, что и изменение значения ΔT при варьировании частоты вращения валков, что подтверждается следующим: в режимах прокатки, где ΔT отрицательное (температура поверхности прутка на выходе из ОД выше температуры прокатки), температура поверхности также превышает температуру осевой зоны прутка.

Стоит отметить, что в рамках исследуемых параметров прокатки аппроксимированная линия изменения значения $T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}$ на обоих концах проходит через ноль, что позволяет подбирать режимы РСП с целью получения наиболее равномерного температурного поля прутка по поперечному сечению.

4.3.3. Влияние температуры нагрева

Влияние изменения температуры нагрева под прокатку (T_0) проявляется следующим образом.

Теплофизические свойства деформируемого металла при заданной температуре прокатки определяют интенсивность изменений его температуры при варьировании других параметров прокатки. 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 это изменение ΔT увеличивается до ~62 °С (рисунок 4.5, 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.

Согласно результатам исследований [114], от температуры нагрева заготовки из титанового сплава ВТЗ-1 зависит скорость её охлаждения на воздухе, что сказывается на температуре заднего конца прутка при достижении ОД даже при малых временных

интервалах. Например, в режимах с $L_0 = 500$ мм и $n = 120$ об/мин при низкой температуре прокатки ($T_0 = 940$ °С) на заднем конце прутка температура поверхности превышает температуру осевой зоны на 24 °С (рисунок 4.5, 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.

Выводы по главе 4

1. Разработана и верифицирована конечно-элементная модель процесса РСП прутков из сплава ВТЗ-1 в ПК QForm. Модель учитывает температурную зависимость теплофизических свойств (теплоёмкость, теплопроводность), реологическое поведение материала, условия контактного теплообмена и трения. Сравнение с экспериментальными данными по основным критериям показало высокую сходимость с относительной ошибкой для всех факторов не более 10 %.

2. Выявлены закономерности влияния длины заготовки, скорости прокатки и исходной температуры нагрева на температурное поле прутка. Увеличение длины заготовки приводит к росту неоднородности температур поверхности вдоль его оси, при этом интенсивность данного эффекта возрастает при повышении температуры нагрева заготовки.

3. При $n = 30$ об/мин, увеличение L_0 от 500 до 1000 мм приводит к возрастанию разницы $(T_{\text{ц}} - T_{\text{р}})_{\text{з.к.}}$ на $\sim 5 \dots 8$ °С. Однако для $L_0 = 1500$ мм эта разница, напротив, уменьшается.

4. При $n = 120$ об/мин и $T_0 = 940 \dots 1000$ °С получено отрицательное значение $(T_{\text{ц}} - T_{\text{р}})_{\text{з.к.}}$, которое при увеличении L_0 от 500 до 1500 мм приближается к нулю. Для $T_0 = 1060$ °С наименьшая разница температур $(T_{\text{ц}} - T_{\text{р}})$ для $L_0 = 500$ мм. Увеличение длины приводит сначала к росту примерно до 11 °С, а затем снижению рассматриваемого показателя до ~ 5 °С.

5. Проведённый многофакторный анализ позволил количественно описать зависимость неравномерности температурного поля прутка от технологических параметров. Полученные зависимости могут служить основой для выбора рациональных режимов РСП, обеспечивающих минимальную неравномерность температурного поля.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕРМО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РСП СПЛАВА ВТЗ-1

В главах 3 и 4 было показано, что температура и накопленная степень деформации (определяемая в том числе коэффициентом вытяжки и количеством проходов) являются решающими параметрами процесса РСП, непосредственно влияющими на формирование макроструктуры и микроструктуры, и, следовательно, свойств сплава ВТЗ-1. Также установлено влияние скоростного режима прокатки, особенно для прутков малого диаметра и длиной более 1500...2000 мм.

На примере результатов этапа № 1 ниже проведен сопоставительный анализ структуры и температурно-деформационных параметров РСП. На рисунке 5.1 показаны данные о величине накопленной степени деформации на различном расстоянии от оси прутка, полученные из моделирования, и балльность макроструктуры (процент занимаемой площади поперечного сечения) для прутков конечного диаметра [109].

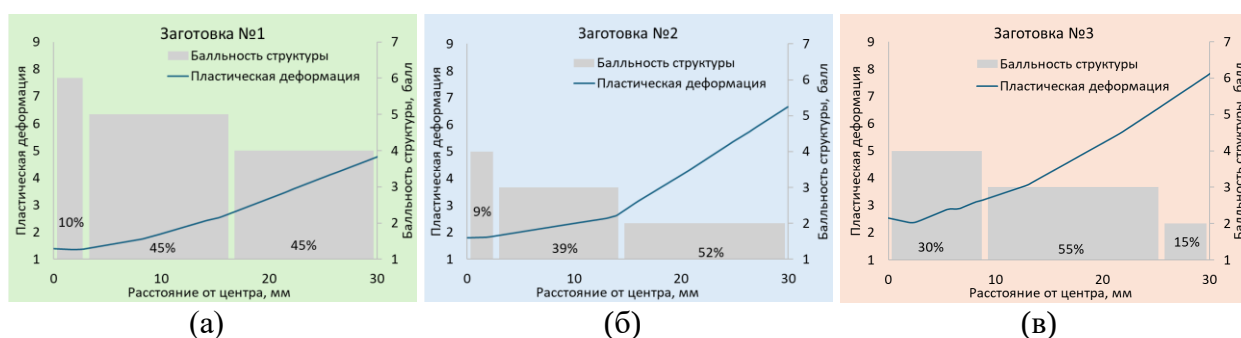


Рисунок 5.1 – Распределение накопленной степени деформации по поперечному сечению прутка после прокатки и процент площади поперечного сечения, занимаемой зерном различной балльности после прокатки при режиме № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в) [109]

Значения накопленной степени деформации возрастают от центра к поверхности прутка, причем с увеличением числа проходов и понижением температуры данный параметр возрастает в центре с ~1,5 до ~2,7 и на поверхности с ~4,75 до ~7,75. В то же время наблюдается коррелирующее снижение балла зерна от центра к поверхности. Температура прутка также снижается от оси к поверхности прутка (рисунок 5.2). После окончания прокатки температура в осевой области прутка соответствует β -области только после прокатки по режиму № 1. Прутки, прокатанные за 3 и 5 проходов после окончания деформации имеют температуру ниже диапазона $T_{\text{пп}}$ [109].

Высокие значения накопленной степени деформации в совокупности с пониженной температурой у поверхности прутка способствуют интенсивному измельчению структуры. Полученные данные также свидетельствуют о том, что существует минимально

необходимое обжатие прутка за один проход и суммарный коэффициент вытяжки для проработки структуры осевой зоны. Для РСП по режиму № 1 с большим коэффициентом вытяжки за проход и высокой температурой прокатки наблюдаются незначительные структурные изменения на 45 % площади, а 55 % площади осевой зоны практически не отличается от исходной по строению микро- и макроструктуры. После однопроходной прокатки при температуре β -области 4 балл зерна соответствует диапазону температур 940...970 °С и накопленной степени деформации ~4...5. Центральная область с 6 баллом зерна сформирована при температуре 980...1000 °С и деформации до ~1,5 [109].

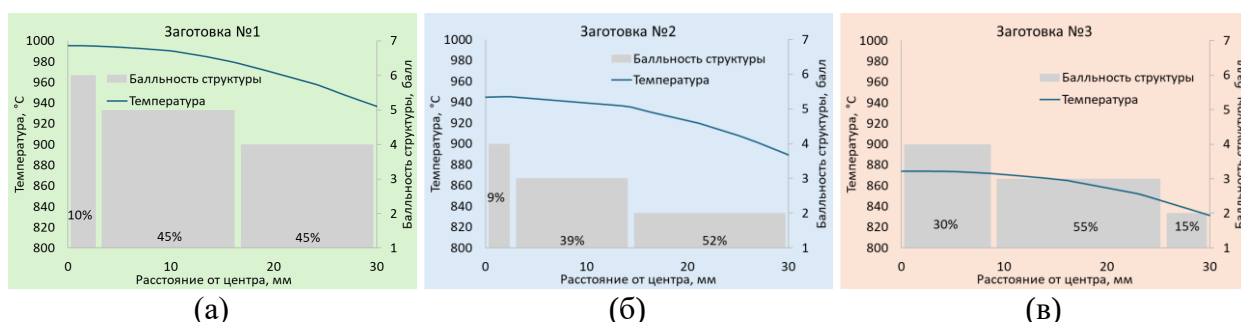


Рисунок 5.2 – Распределение температуры по поперечному сечению прутка после прокатки и процент площади поперечного сечения, занимаемой зерном различной балльности после прокатки при режиме № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в) [109]

Деформация со средними коэффициентами вытяжки в области Тпп позволяет обеспечить трансформацию структурных составляющих на 90 %. В результате РСП за 3 прохода осевая зона, занимающая только 9 % соответствует 4 баллу зерна, полученному при температуре от 930 до 945 °С и накопленной степени деформации не превышающей 2. Макроструктура с 3 баллом зерна наблюдается при 915...930 °С и накопленной степени деформации от 2 до 4. Воздействие нагрева до 880...900 °С и накопленной степени деформации от 4 до 7 привело к формированию в приповерхностном слое 2 балла зерна [109].

Для режима № 3 наблюдаются следующие условия формирования различной балльности зерна: при температуре от 865 до 880 °С и $\bar{\epsilon}^p = 2 \dots 4$ получен 4 балл; при 840...865 °С и $\bar{\epsilon}^p = 4 \dots 7$ получен 3 балл; при 825...840 °С и $\bar{\epsilon}^p = 7 \dots 8$ получен 2 балл. Несмотря на более высокие значения деформации и пониженную температуру прокатки, в данном случае видно, что небольшие обжатия за проход не являются достаточными для изменения структуры центральной зоны, о чем говорит увеличенная область (30 % от площади поперечного сечения) с 4 баллом зерна [109].

Таким образом, в зависимости от температуры нагрева заготовки перед прокаткой и количества проходов условия формирования макроструктуры с одинаковой балльностью

могут значительно отличаться. На основе этого в данной главе проведена разработка рекомендаций по совершенствованию термо-деформационных режимов РСП сплава ВТЗ-1.

5.1. Цифровая модель расчета температурно-деформационных параметров РСП на основе МКЭ и машинного обучения

С помощью созданных и верифицированных МКЭ-моделей 59 экспериментальных прокаток, были получены данные о тепловом и деформированном состоянии прутка в ходе процесса прокатки для переднего (П.К.) и заднего концов (З.К.) по сечению от точки на оси прутка (0) до точки на поверхности прутка (1) с относительным шагом 0,2. Собранные данные включают: температуру прутка на входе в очаг деформации $T_{вх.}$, температуру прутка на выходе из очага деформации $T_{вых.}$ непосредственно во время деформации, конечную температуру прутка после окончания деформации T_k , а также фиксированную накопленную степени деформации ε_k после окончания деформации.

5.1.1. Подготовка данных и обучение ML моделей

На рисунке 5.3 представлен вид базы данных, подготовленной для обучения ML моделей, где входной вектор включает следующие параметры: D_0 мм, L_0 мм, D_1 мм, L_1 мм, μ , μ_Σ , n об/мин, T_0 °C, L_{pos} , R_{pos} , а выходной состоит из значений T_k °C и ε_k , обучение проводилось отдельно для каждого значения выходных параметров.

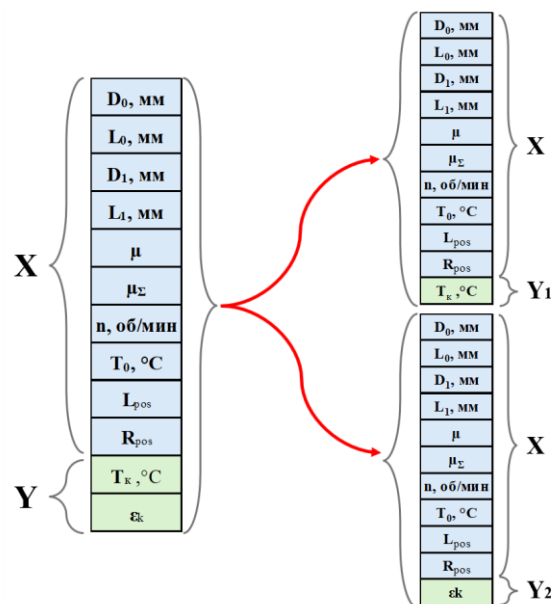


Рисунок 5.3 – Вид исходных таблиц для обработки и подготовки ML моделей

На основе полученных таблиц были сформированы обучающая и тестовые выборки в соотношении 80/20 %.

В качестве ML моделей для решения задачи регрессии были выбраны следующие модели: RandomForest (RF), ExtraTrees (ET), GradientBoosting (GB), XGBoost (XGB), LightGBM (LGBM), SVR, выбор моделей обусловлен их высокой популярностью для решения задач на табличных данных, а также доказанной применимостью при решении задач обработки металлов давлением [115-117].

Для улучшения качества моделей использовалась настройка гиперпараметров. Для автоматизации данного процесса была применена библиотека Optuna [118]. Принципиальная схема процесса обучения с учетом подбора гиперпараметров, аналог которой также применялся в работе [119] представлена на рисунке 5.4.

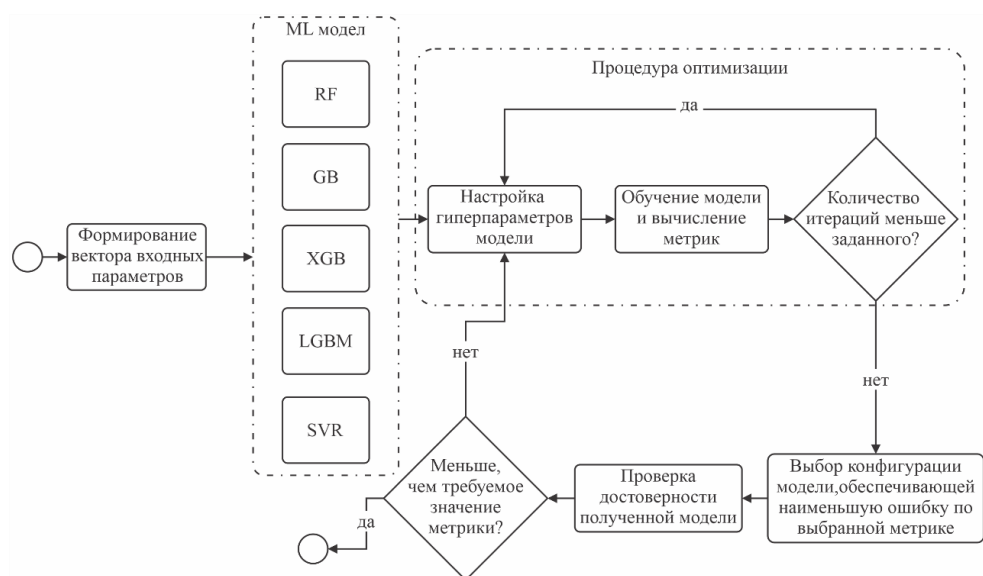


Рисунок 5.4 – Блок-схема подготовки выбранных моделей обучения для определения искомых характеристик

Процесс обучения оценивался с помощью метрики MSE (Mean Squared Error). По завершении данного процесса подготовленные финальные модели далее были апробированы на тестовых и валидационных выборках. В последнюю были включены по два расчета с характерными наборами параметров.

5.1.2. Оценка результатов обученных моделей

Для оценки результатов прогнозов подготовленных моделей были использованы следующие метрики RMSE, MSE, MAE, MAPE, R^2 где:

RMSE (Root Mean Squared Error): квадратный корень из среднеквадратичной ошибки, рассчитывается по формуле (5.1):

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{1}{n} (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5.1)$$

где n – размер базы данных;

y_i – фактическое значение зависимой переменной;

$\hat{y}_i$ – предсказанное моделью значение;

$\bar{y}$ – среднее значение зависимой переменной.

MSE (Mean Squared Error): среднеквадратичная ошибка (5.2):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.2)$$

MAE (Mean Absolute Error): средняя абсолютная ошибка (5.3):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - \hat{y}_i| \quad (5.3)$$

MAPE (Mean Absolute Percentage Error): средняя абсолютная процентная ошибка, определяется по формуле (5.4):

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \quad (5.4)$$

R^2 : коэффициент детерминации, определяется формулой (5.5):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.5)$$

В результате использования обученных моделей на тестовом и тренировочном наборах данных были получены оценки, используемые метрики для каждой ML модели для прогнозирования ϵ_k приведены в таблице 5.1, а для T_k – в таблице 5.2.

Для величины ϵ_k по совокупности метрик лучшей моделью является LightGBM несмотря на то, что значения по RMSE и R^2 для нее незначительно хуже, чем для моделей GradientBoosting, XGBoost и ExtraTrees, однако она обеспечивает минимум MAPE и MAE среди представленных моделей. Большие значения метрики MAPE связаны с чувствительностью к масштабу самой искомой величины.

Таблица 5.1 – Результаты обученных моделей на тестовом и тренировочном множествах ε_k

	RMSE		MAE		MAPE (%)		R ²	
	train	test	train	test	train	test	train	test
GradientBoosting	0,313	1,220	0,213	0,684	9,263	19,560	0,994	0,938
XGBoost	0,356	1,275	0,240	0,693	9,208	19,602	0,992	0,932
LightGBM	0,168	1,310	0,075	0,660	2,719	17,137	0,998	0,928
ExtraTrees	0,496	1,378	0,234	0,747	6,382	46,539	0,985	0,920
RandomForest	0,565	1,531	0,324	0,851	14,556	30,973	0,980	0,902
SVR	1,226	2,250	0,616	1,307	16,966	48,275	0,907	0,788

Таблица 5.2 – Результаты обученных моделей на тестовом и тренировочном множествах T_k

	RMSE		MAE		MAPE (%)		R ²	
	train	test	train	test	train	test	train	test
GradientBoosting	2,294	29,554	1,655	19,055	0,184	2,142	0,998	0,792
XGBoost	14,139	20,938	10,412	17,292	1,183	1,855	0,941	0,896
LightGBM	11,769	22,500	6,875	18,211	0,788	1,998	0,959	0,879
ExtraTrees	7,492	23,124	5,491	16,434	0,615	1,811	0,983	0,873
RandomForest	13,876	22,932	8,419	18,350	0,974	2,022	0,943	0,875
SVR	13,442	30,386	5,722	17,956	0,681	2,072	0,946	0,780

Для величины T_k по совокупности метрик лучшими моделями являются XGBoost и LightGBM, однако, как будет показано далее, таковыми их считать сложно. Несколько хуже себя показывают модели, ExtraTrees, RandomForest. Модель GradientBoosting также достаточно близка к перечисленным моделям по всем метрикам, кроме R^2 . Несмотря на то, что по большинству метрик значения получаются относительно большими, они не превышают 3 % от среднего значения в данном температурном диапазоне.

5.1.3. Экспериментальное сравнение результатов

Обученные модели также были апробированы на данных из валидационной выборки, которые не включены в набор данных для обучения и тестирования на этапах подготовки и тестирования. Входные параметры режимов, определённые для проверки, приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Входные параметры режимов, определённые для проверки моделей

№ режима	D_0 , мм	L_0 , мм	D_1 , мм	L_1 , мм	μ	μ_Σ	n, об/мин	T_0 , °C
П1	60	315	43	626	2,0	2,0	60	1070
П2	30	957	27	1180	1,2	2,4	58	930

Результаты сравнения значения прогнозирования пластических деформаций с экспериментами представлены на рисунке 5.5.

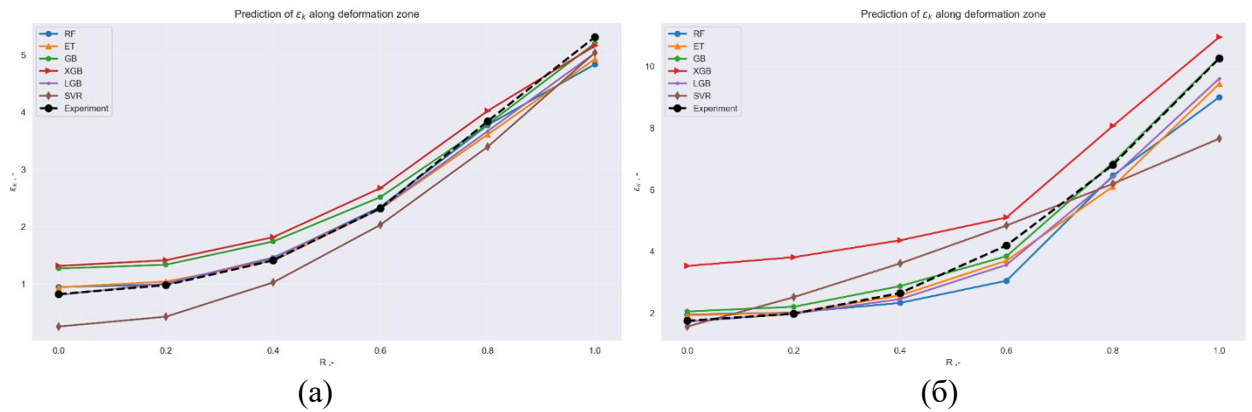


Рисунок 5.5 – Результаты сравнения прогнозирования ε_k с экспериментами для режимов: П1 (а); П2 (б)

Как видно из рисунка 5.5, все модели стремятся к повторению формы распределения величины ε_k по сечению, однако в количественном выражении разница между ними становится еще более значительной. Так для моделей XGBoost и GradientBoosting ошибки по метрике MAPE для режимов П1 и П2 составляют 26,012 % и 21,072 %, соответственно. ExtraTrees справляются с задачей прогнозирования ε_k лучше. Ошибка по MAPE не превосходит 12% в обоих случаях. Модель LightGBM показала на валидационной выборке также наилучший результат среди представленных моделей. Так для режимов П1 и П2 значения по метрике MAPE составляют 2,972 % и 6,029 % соответственно.

Результаты прогнозирования температуры вдоль поперечного сечения прутка в конце прокатки по сравнению с экспериментами представлены на рисунке 5.6

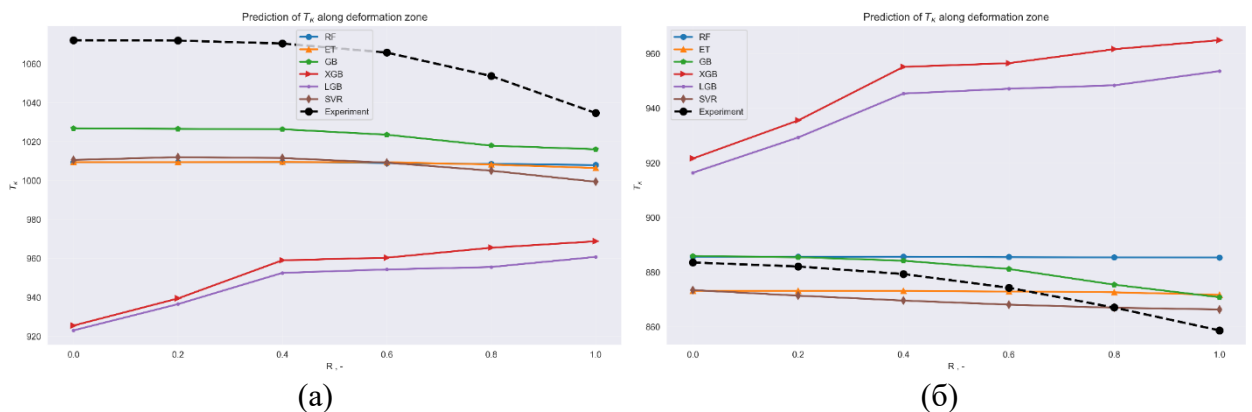


Рисунок 5.6 – Результаты сравнения прогнозирования T_k с экспериментами для режимов: П1 (а); П2 (б)

Модели для определения температур визуально справляются хуже с построением прогнозов (рисунок 5.6). Кроме того, можно заметить, что модели XGBoost и LightGBM, заметно выбиваются как по прогнозируемым значениям, так и по характеру их распределения по сечению. Разница по MAPE для этих моделей для режима П2 составляет

8,609 % и 7,556 %, для режима П1 составляет 10,181 % и 10,746 % соответственно. Для данных случаев, которые представлены на рисунке 5.6, лучшей моделью является GradientBoosting, так как она более стабильна и умеренно определяет нелинейный характер зависимостей. ExtraTrees и SVR имеют почти линейный вид в обоих случаях, что дополнительно может свидетельствовать о плохой обобщающей способности.

5.2. Регулирование температурных условий РСП за счет скоростного режима

На рисунке 5.7 показана установленная с помощью моделирования МКЭ зависимость разницы температуры между П.К. и З.К. от частоты вращения валков и температуры заготовки (рисунок 5.7, а, в, д) и разницы температур между температурой нагрева и средней температурой прутка на выходе (рисунок 5.7, б, г, е). Все полученные данные с высокой точностью ($R^2 > 0,96$) описываются полиномиальной зависимостью второй степени.

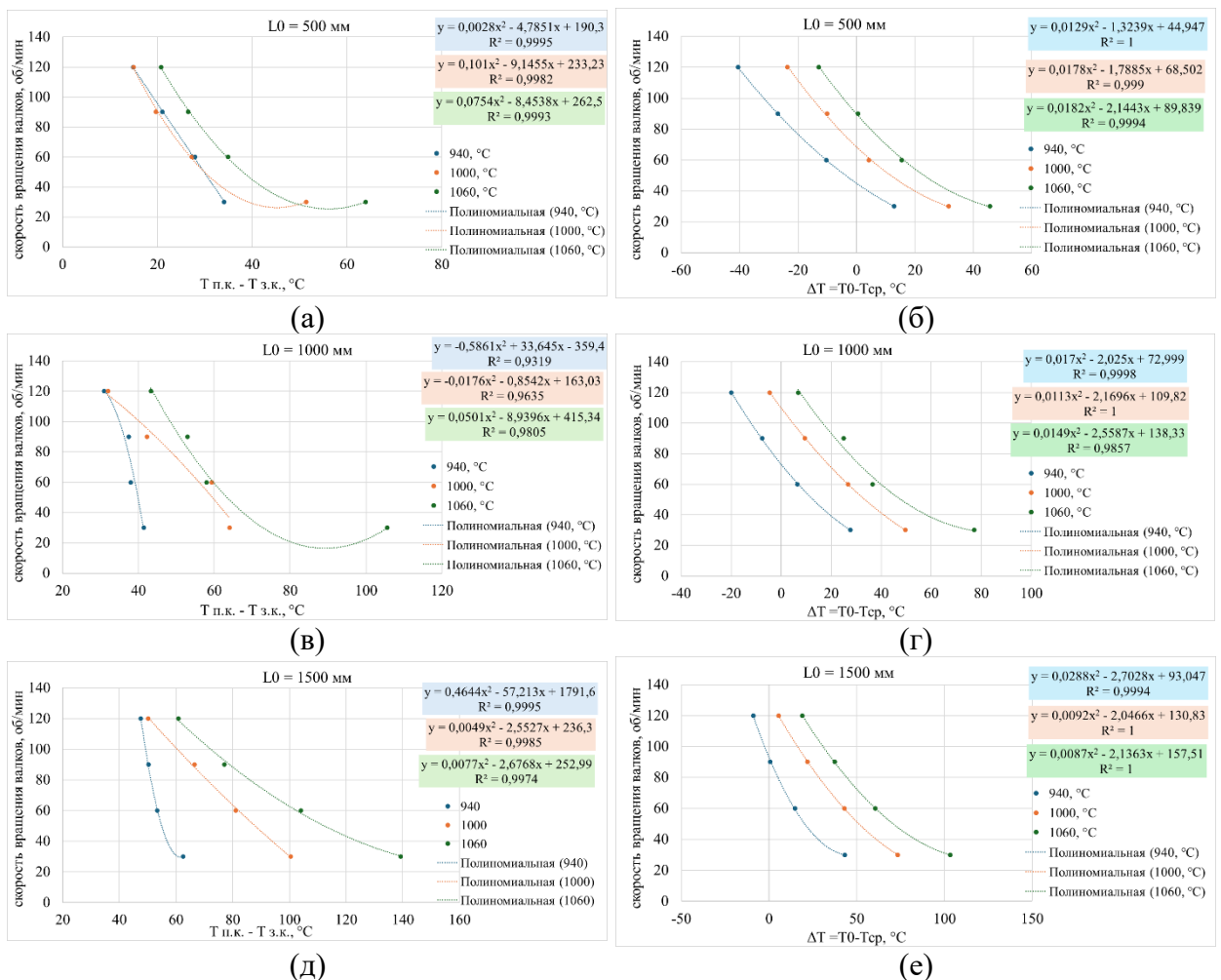


Рисунок 5.7 – Зависимость разницы температуры между П.К. и З.К. от частоты вращения валков и температуры заготовки (а, в, д) и разницы температур между температурой нагрева и средней температурой прутка на выходе (б, г, е)

Для всех вариантов выявлено увеличение разницы температур между передним и задним концами с уменьшением частоты вращения валков. Причем интенсивность увеличения этой разницы возрастает с повышением температуры. Так, например, для заготовки максимальной длины $L_0 = 1500$ мм и температуре $T_0 = 940$ °С разница между П.К. и З.К. изменяется от 48 до 63 °С, в то время как для температуры $T_0 = 1060$ °С аналогичная разность меняется уже от 61 до 139 °С.

Для разницы ΔT , показывающей отклонение средней температуры прутка на выходе от исходной температуры нагрева, получены аналогичные по характеру зависимости для всех значений варьируемых факторов (n , T_0 , L_0). С ростом температуры T_0 ширина диапазона изменения ΔT при различных скоростях увеличивается. Также можно отметить, что с ростом длины заготовки диапазон изменения ΔT смещается в сторону положительных значений. При максимальной длине заготовки L_0 и минимальной частоте вращения $n = 30$ об/мин разница между температурой прутка на выходе и температурой нагрева может превышать 100 °С.

Не менее важным с точки зрения требований к структуре и свойствам является возможность снижения неравномерности температуры по поперечному сечению прутка. С этой целью также на основе результатов многофакторного МКЭ моделирования были получены зависимости разницы температур между центром и поверхностью ($T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}$) для различной длины заготовки, температуры нагрева T_0 и частоты вращения валков (рисунок 5.8).

При прочих равных условиях, зависимость $T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}$ также описывается полиномиальной функцией второй степени с высокой точностью ($R^2 = 0,99 \dots 1$), кроме З.К. для длины заготовки 1500 мм. С увеличением температуры нагрева T_0 разница температур по сечению смещается в сторону положительных значений.

Для всех вариантов температур, но в большей степени для более низких, соответствующих нижней границе $T_{\text{пп}}$ или α -области, при высокой скорости прокатки ($n = 90 \dots 120$ об/мин) наблюдается отрицательная разница $T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}$, что говорит о более высокой температуре поверхности. Это также подтверждает сделанные выводы о более интенсивном деформационном выделении тепла за счет высокой скорости деформации на поверхности прутка, а также разогреве поверхности за счет повышенного скольжения при низких температурах и высокой скорости.

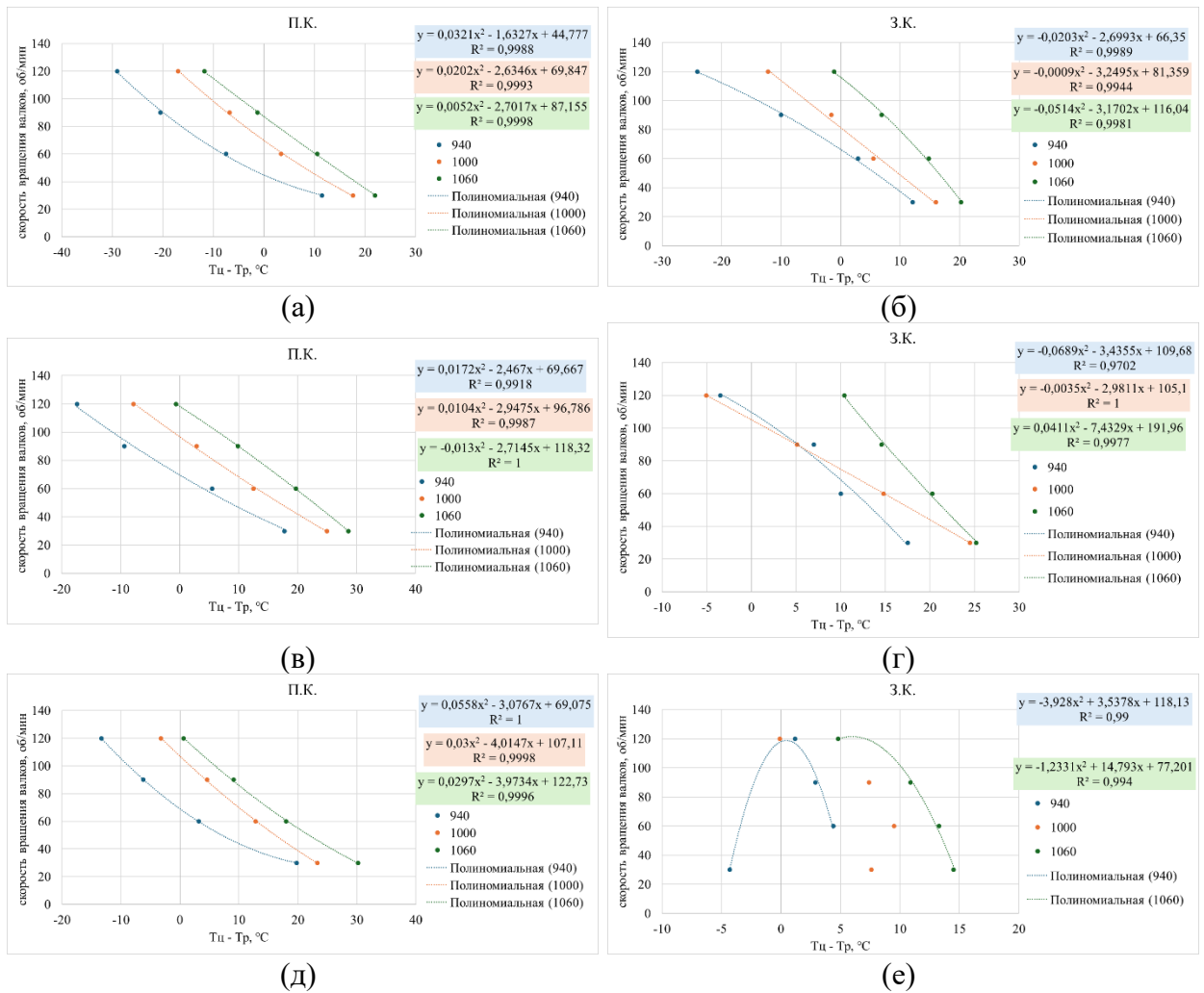


Рисунок 5.8 – Зависимость разницы температуры между поверхностью (T_p) и центром ($T_{\text{ц}}$) прутка для П.К. (а, в, д) и З.К. (б, г, е) от частоты вращения валков и температуры заготовки для исходной длины заготовки $L_0 = 500$ мм (а, б); $L_0 = 1000$ мм (в, г); $L_0 = 1500$ мм (д, е)

Полученные зависимости позволяют рассчитать температурно-скоростной режим РСП, при котором может быть обеспечен минимальный градиент температур как по длине, так и по поперечному сечению, либо сохранение средней температуры прутка, равной температуре нагрева заготовки. Стоит отметить, что выполнение условия равенства средней температуры прутка исходной температуре нагрева не обеспечит равномерности по длине, особенно для заготовок длиной 1000 мм и более, т.к. средняя температура может быть одинаковой при значительно разных минимумах и максимумах температуры прутка переднего и заднего концов. Поэтому данная характеристика может быть дополнительным ориентиром для проверки стабильности процесса прокатки.

Для заготовки длиной 1000 мм и $D_0 = 30$ мм на основе проведенного регрессионного анализа зависимости ΔT от частоты вращения валков при различных температурах нагрева заготовки были определены значения n , обеспечивающие $\Delta T = 0$ °C при прокатке с $\mu = 1,7$. Для $T_0 = 940, 1000, 1060$ °C рассчитанные значения n , минимизирующие ΔT , составляют 73,

109,8 и 138,3 об/мин, соответственно. Результаты моделирования процесса РСП по вышеописанным режимам, включая характеристики температурного поля прутка, представлены на рисунке 5.9.

Разница между средней температурой поверхности прутка и температурой его нагрева под прокатку не превышает 1,5 °С (рисунок 5.9, а). Температура по поперечному сечению характеризуется равномерностью: на переднем конце $|T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}| < 6$ °С при $T_0 = 1060$ °С (рисунок 5.9, в), на заднем конце $|T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}| < 9$ °С при $T_0 = 940$ °С (рисунок 5.9, г). Однако температура поверхности прутка вдоль его оси остается более неравномерной (рисунок 5.9, б): при $T_0 = 1060$ °С и $n = 138,3$ об/мин разница температур поверхности прутка между П.К. и З.К. превышает 39 °С. Хотя по сравнению с результатами многофакторного моделирования такая разница ниже, это свидетельствует о возможности достижения положительного эффекта управления частоты вращения валков на равномерность температурного поля прутка в ходе процесса РСП.

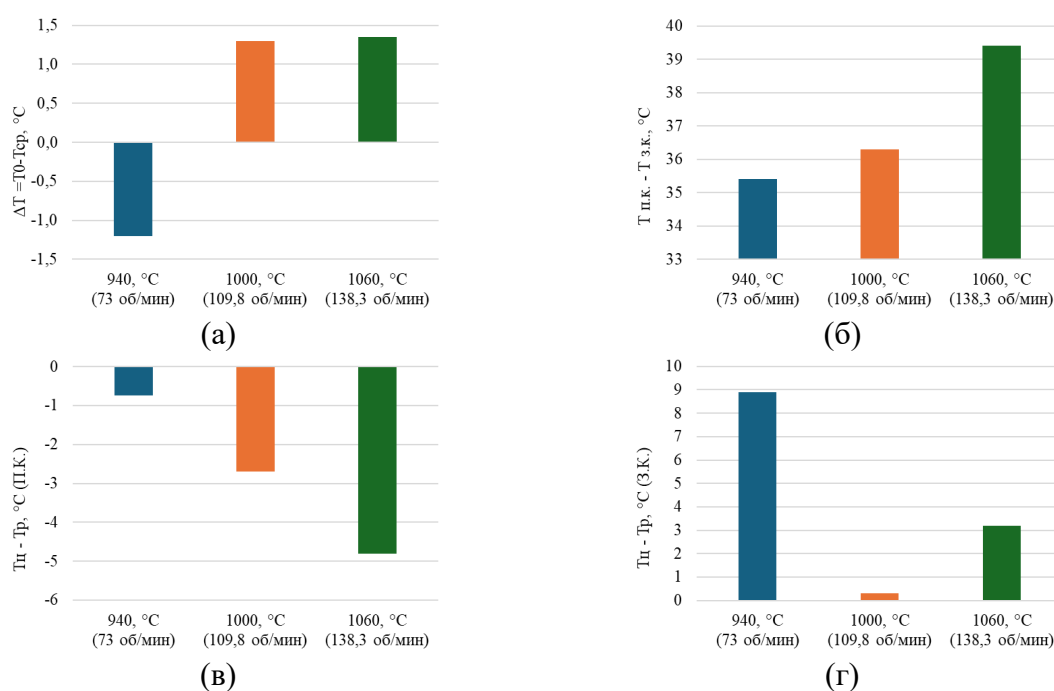


Рисунок 5.9 – Характеристики температурного поля прутка: ΔT (а); $T_{\text{п.к.}} - T_{\text{з.к.}}$ (б); $T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}$ для П.К. (в); $T_{\text{ц}} - T_{\text{р}}$ для З.К. (г) при частоте вращения валков, соответствующей минимальной ΔT для каждой температуры прокатки

Известен способ для обжатия исходной трубной заготовки с повышением частоты вращения валков по ходу прокатки [120], что позволяет избежать критического снижения температуры заднего конца. Учитывая особую актуальность данной проблемы при прокатке прутков малого диаметра (<40 мм) из двухфазных титановых сплавов, проведен виртуальный эксперимент по изменению скоростного режима в процессе РСП.

Рассмотрено три варианта температуры нагрева под прокатку $T_0 = 1050, 990, 960$ °С. Диаметр исходной заготовки составлял $D_0 = 30$ мм, длина $L_0 = 1000$ мм, диаметр прутка 23 мм, коэффициент вытяжки 1,7. За основу принято несколько стратегий ведения процесса прокатки (Таблица 5.4):

- 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).

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, сравнивает с температурой нижнего (или верхнего) предела температуры $T_{\text{min(max)}}$ и в зависимости от результата реализует вариант повышения, снижения или сохранения значения частоты вращения валков. Величина нижнего предела температуры для работы подпрограммы указана в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Параметры варьирования скоростных режимов РСП

Режим	T_0 (°C)	Нижний предел T_{min} (°C)	Диапазон n , об/мин	Вариант изменения n
1050 °C_static_60	1050	-	60	-
1050 °C_line_1,2	1050	-	60...120	Функция $y = kx + b$ ($k = 1,2$)
1050 °C_line_1,5	1050	-	60...120	Функция $y = kx + b$ ($k = 1,5$)
1050 °C_60_120/5	1050	1020	60...120	Изменение в зависимости от текущей $T_{\text{вых}}$ (шаг 5 об/мин)
960 °C_static_60	960	-	60	-
960 °C_60-120/10	960	940	60...120	Изменение в зависимости от текущей $T_{\text{вых}}$ (шаг 10 об/мин)
990 °C_static_60	990	-	60	-
990 °C_60-120/5	990	960	60...120	Изменение в зависимости от текущей $T_{\text{вых}}$ (шаг 5 об/мин)

На рисунках 5.10 и 5.11 показаны результаты расчета температуры на входе и выходе из ОД, а также вариант изменения частоты вращения валков.

При $T_0 = 1050$ °С и $n = \text{const}$ температура поверхности прутка на выходе к концу прокатки опускается до ~910 °С. Для линейных функций регулирования с повышением n удается повысить данную величину до ~960...970 °С. Пошаговое регулирование обеспечивает поддержание температуры заднего конца на уровне 980 °С. Ни один из

вариантов в рамках выбранного диапазона скоростей не обеспечивает сохранение температуры заднего конца в пределах установленного нижнего предела 1020 °С, но ступенчатое регулирование имеет более существенный эффект. В связи с этим для температур 990 и 960 °С исследовался только вариант ступенчатого регулирования скорости.

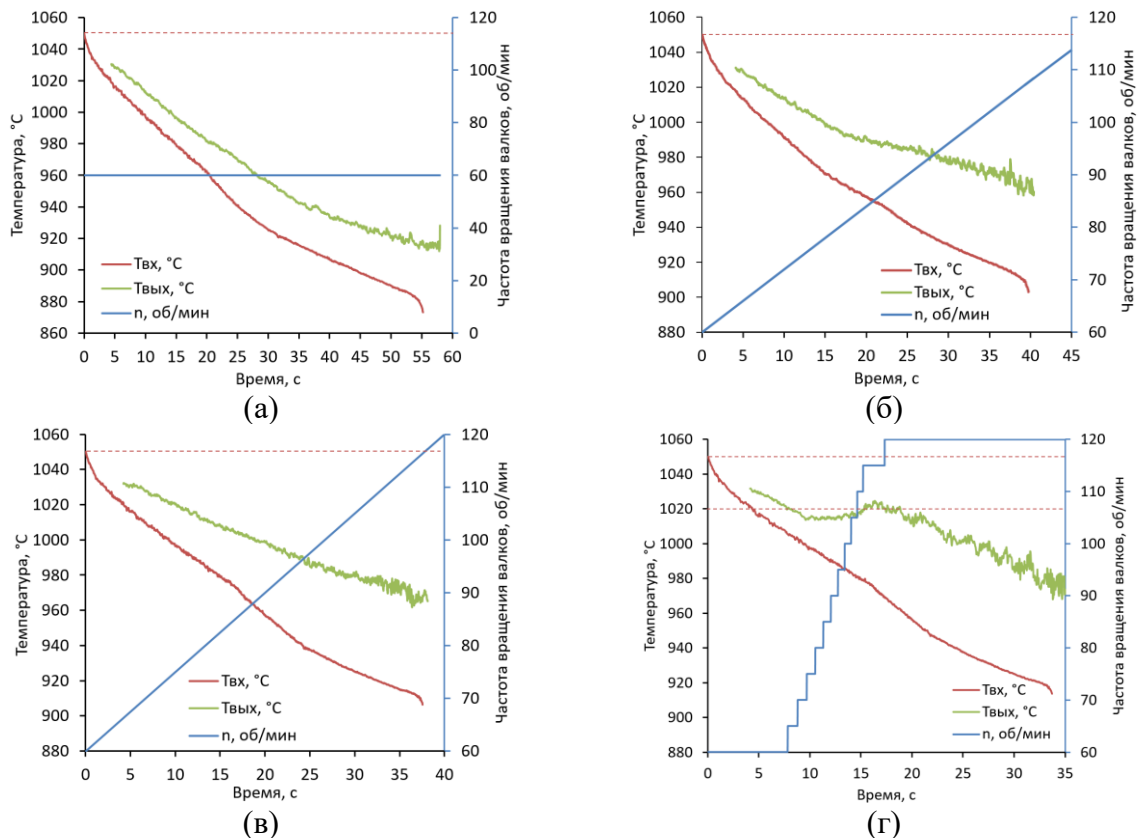


Рисунок 5.10 – Изменение температуры $T_{вх}$ и $T_{вых}$ при режиме работы привода (n): 1050 °C_static_60 (а); 1050 °C_line_1,2 (б); 1050 °C_line_1,5 (в); 1050 °C_60-120/5 (г)

Из рисунка 5.11, (б и г) видно, что пошаговое регулирование частоты вращения валков в диапазоне 60...120 об/мин практически обеспечивает поддержание $T_{вых}$ на уровне не ниже заданного T_{min} .

На рисунке 5.12, (а и в) показано сравнение изменения температуры на выходе из ОД для разных вариантов регулирования частоты вращения валков. Такой подход обеспечивает не только увеличение температуры прутка на величину ΔT , но и дает сокращение машинного времени прокатки на величину Δt . Для температуры $T_0 = 1050$ °С сокращение времени составляет ~31 %, для $T_0 = 990$ °С – ~44 %, а для $T_0 = 960$ °С – около 38 %.

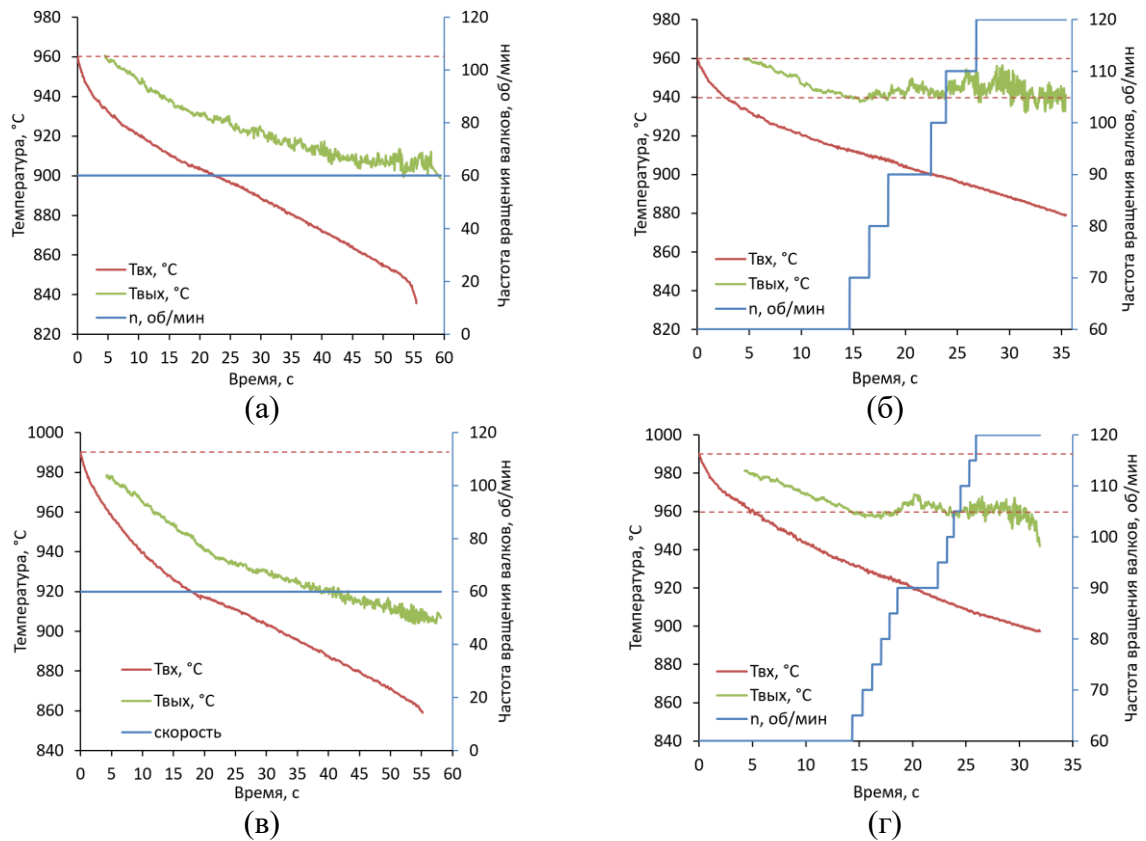


Рисунок 5.11 – Изменение температуры $T_{вх}$ и $T_{вых}$ при режиме работы привода (n) $960^{\circ}\text{C_static_60}$ (а); $960^{\circ}\text{C_60-120/10}$ (б); $990^{\circ}\text{C_static_60}$ (в); $990^{\circ}\text{C_60-120/5}$ (г)

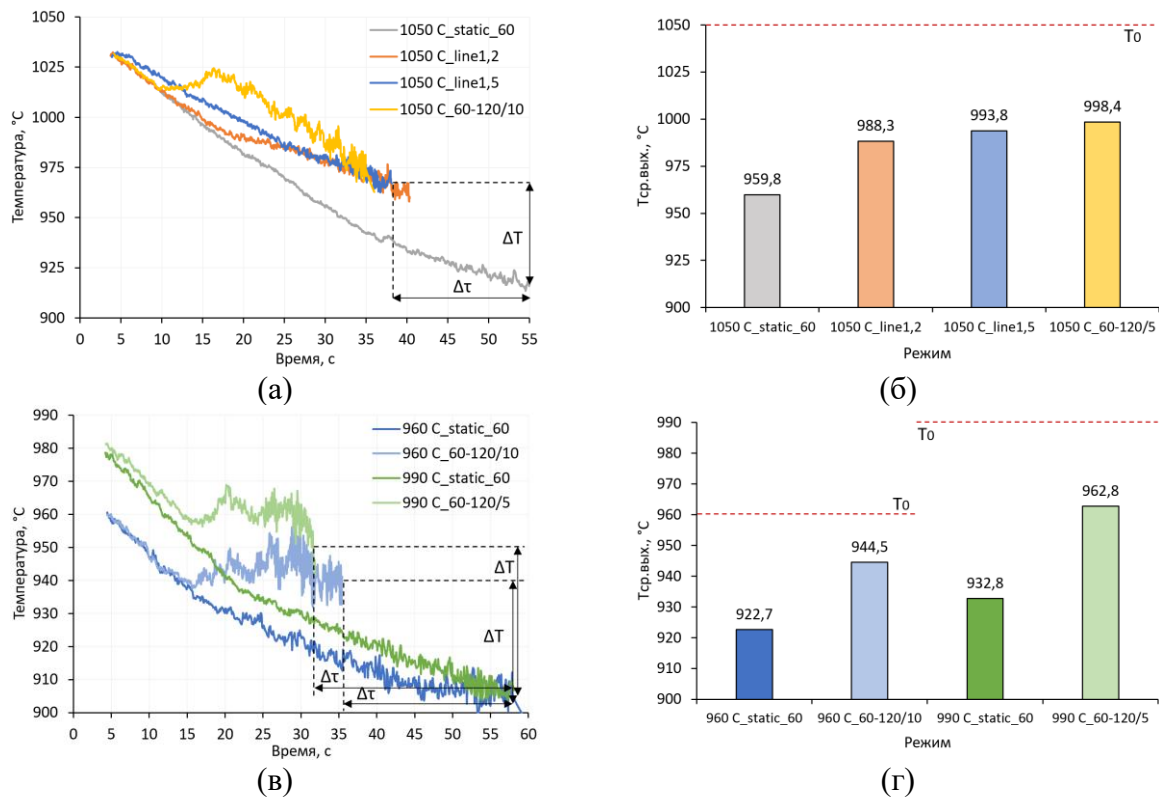


Рисунок 5.12 – Сравнение $T_{вых}$ (а, в) и средней температуры на выходе $T_{ср.вых}$ (б, г) для различных режимов работы привода

Оценку эффективности регулирования скоростного режима также возможно количественно оценить по средней температуре прутка на выходе (рисунок 5.12, б и г). Для высокой температуры прокатки ($T_0 = 1050$ °С) максимальное значение $T_{\text{ср.вых}}$ составляет 998,4 °С, что в сравнении с режимом static_60 превышает на 38,6 °С. Для температур 990 и 960 °С повышение средней температуры прутка составляет примерно 22 и 30 °С.

5.3. Предложения по совершенствованию термо-деформационных режимов радиально-сдвиговой прокатки прутков из сплава ВТЗ-1

Проведенные комплексные исследования на основе экспериментов и компьютерного моделирования позволили установить качественные и количественные закономерности влияния технологических параметров РСП на температурное поле, НДС, эволюцию макро- и микроструктуры прутков, а также силовые и кинематические параметры процесса. На основе полученных данных в данном разделе разработаны рекомендации по выбору рациональных режимов РСП прутков из сплава ВТЗ-1.

5.3.1 Выбор температурного режима деформации

Температурный диапазон прокатки является ключевым фактором, определяющим структурно-фазовое состояние сплава ВТЗ-1. Следовательно для получения требуемого типа микроструктуры и балла макрозерна необходимо регламентировать температуру нагрева металла под прокатку, температуру деформации и ее окончания.

- Для получения мелкозернистой макроструктуры с 1-2 баллом и глобулярной или переходной (бимодальной) микроструктуры рекомендуется осуществлять основную часть деформации в двухфазной $\alpha+\beta$ -области при температурах 930–980 °С. Полученные результаты показали, что РСП при 930...960 °С (режимы № 1-2-2 и 3-2-1) обеспечивает наиболее равномерную проработку структуры по сечению с баллом зерна 1. Деформация при температурах ниже 900 °С (α -область) приводит к росту усилий прокатки, увеличению градиента деформации по сечению.

- Для получения пластинчатой микроструктуры или структуры типа корзиночного плетения необходима деформация в β -области. Однако, как показано в первом этапе, однопроходная прокатка при этих температурах ведет к формированию крупнозернистой макроструктуры в осевой зоне из-за интенсивного роста зерен и недостаточной деформационной проработки. Для дробления литой структуры и снижения балла зерна в β -области необходимо использовать многопроходные схемы с контролируемым охлаждением или комбинированные режимы с окончанием деформации в $\alpha+\beta$ -области (режим 2-3-1).

- Для обеспечения равномерности структуры по длине прутка необходимо избегать падения температуры заднего конца заготовки ниже нижней границы $\alpha+\beta$ -области в момент входа в очаг деформации. Как показано в работе, для заготовок длиной более 1000 мм разница температур между передним и задним концом может достигать 100...150 °С, что приводит к различиям в балле зерна между передним и задним концом.

5.3.2 Выбор деформационного и скоростного режима

- Минимальный суммарный коэффициент вытяжки μ_{Σ} для проработки макроструктуры осевой зоны исходной заготовки диаметром 95 мм до 1...3 балла должен составлять не менее 5,0...7,0.

- Рациональный коэффициент вытяжки за проход при прокатке в $\alpha+\beta$ -области составляет $\mu = 1,2...1,5$. Как показано на примерах режимов № 3-3 и 3-3*, многопроходная РСП с такими обжатиями обеспечивает более равномерное распределение деформации по сечению и лучшее измельчение зерна в осевой зоне, чем прокатка с высоким коэффициентом вытяжки за проход ($\mu \geq 2,0$). Высокие обжатия за проход при температурах вблизи Тпп ведут к локальному деформационному разогреву осевой зоны и росту зерна.

- Возможна реализация режимов с прокаткой в первых проходах в β -области с высокими коэффициентами вытяжки за проход, если в дальнейшем возможна прокатка с суммарным μ_{Σ} не менее 5,0 и при температуре $\alpha+\beta$ -области.

- Для заготовок из сплава ВТЗ-1 диаметром 20...40 мм и длиной 1000...1500 мм и более при температуре нагрева под прокатку 930...1000 °С целесообразно начинать прокатку с частоты вращения валков 50...60 об/мин, постепенно увеличивая ее до 90...120 об/мин к моменту выхода заднего конца. Режим изменения скорости может быть задан линейной функцией, либо ступенчатым изменением в зависимости от сигнала обратной связи.

Выводы по главе 5

1. На основе верифицированной конечно-элементной модели и с использованием методов машинного обучения (RandomForest, ExtraTrees, GradientBoosting, XGBoost, LightGBM, SVR) создана предиктивная модель для прогнозирования конечной температуры и накопленной степени деформации для прутков после РСП. Лучшие результаты по совокупности метрик оценки точности RMSE, MAE, MAPE, R^2 показала модель GradientBoosting (ошибки не превышают 10 %). Это подтверждает возможность оперативного прогнозирования термо-деформационных параметров без проведения трудоёмких экспериментов.

2. Установлены аналитические зависимости разницы температур между передним и задним концом и «центр – поверхность» от частоты вращения валков, температуры нагрева

заготовки 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 ($n = 90 \dots 120$ 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 выделении тепла 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 как по длине, так и по поперечному сечению, либо сохранена средняя температура прутка, равная температуре нагрева заготовки.

3. Предложена стратегия регулирования частоты вращения валков в процессе прокатки. Для температур нагрева 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 $n = \text{const}$. Наиболее эффективно пошаговое регулирование, которое позволяет поддерживать температуру заднего конца на заданном уровне, что дает возможность управления температурными условиями РСП прутков малого диаметра длиной более 1000 мм.

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 ($T_0 = 930 \dots 1070$ °C, $D_0 = 40 \dots 95$ мм, $L_0 = 150 \dots 1800$ мм, $\mu = 1,1 \dots 2,4$, $n = 20 \dots 90$ 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 обжатия определяет характер изменения температуры прутка. Многопроходная прокатка уменьшает различия в микро-макроструктуре 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 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 термодеформационные 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 $T_0 = T_{\text{пп}} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, способствует получению прутков длиной не менее 1700 мм с равномерной макроструктурой (1 балл) и бимодальной глобулярно-пластинчатой микроструктурой по всему объёму прутка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ильин, А. А. Титановые сплавы: состав, структура, свойства : справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин. – М. : ВИС-МАТИ, 2009. – 519 с.
2. Galkin S. P., Kin T. Y., Gamin Y. V. et al. Review of scientific-applied research and industrial application of radial shear rolling technology // CIS Iron Steel Rev. – 2024. – Т. 27. – №. 1. – С. 35-47.
3. Galkin S. P., Kharitonov E. A., Romanenko V. P. Radial-shear rolling as a new high-efficient method for metal forming // Progressive metal forming technologies. A manual. Moscow: IRIAS. – 2009. – С. 293-302.
4. Kin T. Y., Gamin Y. V., Galkin S. P., Skugorev A. V. Numerical simulation of workpiece temperature field during radial shear rolling of biomedical Co-Cr-Mo alloy // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2023. – Т. 31. – №. 6. – С. 065002.
5. Skripalenko M. M., Galkin S. P., Karpov B. V. et al. Forming features and properties of titanium alloy billets after radial-shear rolling // Materials. – 2019. – Т. 12. – №. 19. – С. 3179.
6. Nguyen S. Z., Gamin Y. V., Akopyan T. K. Analysis of temperature and the stress and strain state of alloy 01570 using a simulation method for radial shear rolling // Tsvetnye Metally. – 2024. – Т. 2024. – №. 4. – С. 84-91.
7. Gamin Y., Akopyan T., Galkin S. et al. Effect of radial shear rolling on grain refinement and mechanical properties of the Al–Mg–Sc alloy // Journal of Materials Research. – 2023. – Т. 38. – №. 20. – С. 4542-4558.
8. Gamin Y. V., Belov N. A., Akopyan T. K. et al. Effect of radial-shear rolling on the structure and hardening of an Al–8% Zn–3.3% Mg–0.8% Ca–1.1% Fe alloy manufactured by electromagnetic casting // Materials. – 2023. – Т. 16. – №. 2. – С. 677.
9. Lopatin N. V., Salishchev G. A., Galkin S. P. Mathematical modeling of radial-shear rolling of the VT6 titanium alloy under conditions of formation of a globular structure // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2011. – Т. 52. – №. 5. – С. 442-447.
10. Gamin Y. V., Koshmin A. N., Kin T. Y., Aleshchenko A. S. Comparative analysis of stress-strain state of bars from aluminum alloys A2024 and A7075 processed by RSR based on FEM modeling // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Т. 46. – С. 8138-8142.
11. Galkin S. P., Gamin Y. V., Kin T. Y. Analysis of temperature influence on strain–speed parameters of radial-shear rolling of Al–Zn–Mg–Ni–Fe alloy // Materials. – 2022. – Т. 15. – №. 20. – С. 7202.

12. Харитонов Е. А., Романенко В. П., Будников А. С. Моделирование процесса раскатки труб на трехвалковом раскатном стане винтовой прокатки // Сталь. – 2014. – №. 10. – С. 44-47.
13. Богатов А. А., Павлова Е. А., Павлов Д. А. Разработка математической модели нового процесса продольной прокатки труб // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : материалы международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Екатеринбург, 26-30 ноября 2013 г.). – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2014. — С. 423-426.
14. Пат. 2759820 С1 Российская Федерация, МПК В21В 19/04. Способ винтовой прошивки в четырехвалковом стане / Онучин А. Б., Романцев Б. А., Гончарук А. В., Гамин Ю. В. – № 2021104530 ; заявл. 24.02.2021 ; опубл. 18.11.2021, Бюл. № 32. – 10 с. : ил.
15. Выдрин А. В., Широков В. В. Теоретические основы повышения точности размеров труб при прокатке на непрерывном стане // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2011. – №. 14 (231). – С. 81-86.
16. Парфенов В. А., Шелест А. Е., Хесуани Ю. Д. и др. Совершенствование процесса прошивки непрерывнолитых заготовок на двухвалковых винтовых станах с использованием направляющего инструмента // Сталь. – 2019. – №. 3. – С. 31-34.
17. Гамин Ю. В., Галкин С. П., Романцев Б. А. и др. Влияние режимов радиально-сдвиговой прокатки на расходный коэффициент и свойства прутков из алюминиевого сплава Д16 // Металлург. – 2021. – № 6. – С. 56-63.
18. Рубцов В. Ю., Шевченко О. И., Курочкин В. В., Опарин А. С. Распределение температурных полей и удельных обжатий при прокатке мелющих шаров // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – Т. 75. – №. 7. – С. 834-840.
19. Дубинский Ф.С. Методы проектирования температурных режимов горячей сортовой прокатки : учебное пособие / Ф. С. Дубинский, М. А. Соседкова. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 18 с.
20. Гамин Ю. В., Галкин С. П., Нгуен С. З., Акопян Т. К. Анализ температурно-деформационных условий прокатки алюминиевого сплава Al–Mg–Sc на основе моделирования методом конечных элементов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2022. – №. 3. – С. 57-67.
21. Akopyan T. et al. Effect of process parameters on the microstructure and mechanical properties of bars from Al-Cu-Mg alloy processed by multipass radial-shear rolling // Journal of Materials Science. – 2022. – Т. 57. – №. 17. – С. 8298-8313.

22. Алексеев П. Л., Харитонов Е. А., Вольшонок И. З., Беляева Н. Ю. Исследование состояния металла в процессе радиально-сдвиговой прокатки на стане СРВП-130 // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – №. 1. – С. 39-44.
23. Алексеев П. Л. Исследование температурного поля в объеме заготовки с целью управления тепловым режимом при радиально-сдвиговой прокатке : дис. ... канд. тех. наук : 05.16.05 / Алексеев Павел Леонидович. – М., 2005. – 127 с.
24. Харитонов Е. А., Семенцов В. А., Душин В. С. и др. Сравнение схем радиально-сдвиговой прокатки по основным параметрам процесса и формируемой структуре титановых прутков // Технология легких сплавов. – 2014. – №. 2. – С. 96-100.
25. Karpov B. V., Patrin P. V., Galkin S. P et al. Radial-shear rolling of titanium alloy VT-8 bars with controlled structure for small diameter ingots (≤ 200 mm) // Metallurgist. – 2018. – Т. 61. – №. 9. – С. 884-890.
26. Negodin D. A., Galkin S. P., Kharitonov E. A. et al. Testing of the technology of radial-shear rolling and predesigning selection of rolling minimills for the adaptable production of titanium rods with small cross sections under the conditions of the “CHMP” JSC // Metallurgist. – 2019. – Т. 62. – №. 11. – С. 1133-1143.
27. Восканьянц А.А. Автоматизированное управление процессами прокатки: Учеб. пособие / А.А. Восканьянц; Московский гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – 85 с.
28. Беленький А. М. Автоматическое управление металлургическими процессами / А. М. Беленький, В. Ф.Бердышев, О. М. Блинов, В. Ю. Каганов. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
29. Шевакин Ю. Ф., Рытиков А. М., Касаткин Н. И. Технологические измерения и приборы в прокатном производстве / Ю. Ф. Шевакин, А. М. Рытиков, Н. И. Касаткин. – М.: Металлургия, 1973. – 368 с.
30. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы : получение, структура и свойства : монография / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Академкнига, 2007. – 397 с.
31. Носкова Н. И. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы / Н. И. Носкова, Р. Р. Мулюков. – Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2003. – 279 с.
32. Горынин И. В., Орыщенко А. С., Кудрявцев А. С., Ушаков Б. Г. Титановые сплавы для морских конструкций и судового машиностроения // Технология легких сплавов. – 2014. – №. 3. – С. 6-13.

33. Бубнов В. А., Князев А. Н. Титан и его сплавы в машиностроении // Вестник Курганского государственного университета. – 2016. – №. 3 (42). – С. 92-96.
34. Иванов К. В., Найденкин Е. В., Лыкова О. Н. и др. Эволюция структуры и механических свойств сплава ВТ6 при поперечно-винтовой прокатке и последующих деформационных и термических обработках // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60. – №. 7. – С. 126-132.
35. Калинин А. О., Краснокутский А. Н. Применение титановых сплавов для шатунов высокофорсированных авиационных дизелей // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2011. – №. 13. – С. 20.
36. Bratukhin A. G. Application of weldable titanium alloys in the Russian aviation industry // Welding international. – 1997. – Т. 11. – №. 11. – С. 902-905.
37. Егорова Ю. Б., Давыденко Л. В., Чибисова Е. В. и др. Прогнозирование механических свойств прутков из титанового сплава ВТ6 с разным типом структуры // Технология легких сплавов. – 2022. – №. 3. – С. 30-40.
38. Бургонова О. Ю., Пантюхова К. Н., Белозерова Е. П. Определение рационального режима термической обработки сплава ВТ3-1 для повышения пластичности перед обработкой давлением // Омский научный вестник. – 2017. – №. 3 (153). – С. 44-48.
39. Григоренко Г. М., Костин В. А., Григоренко С. Г. Расчет равновесных диаграмм состояния и фазовых превращений титановых сплавов системы титан–алюминий // Современная электрометаллургия. – 2018. – №. 3. – С. 39-44.
40. Егорова Ю. Б., Мамонов И. М., Давыденко Л. В. Исследование комплекса механических свойств прутков из сплава ВТ6 в зависимости от химического состава и типа структуры // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2019. – Т. 7. – №. 4. – С. 44-49.
41. Александров В. К. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров, Н. Ф. Антошкин, Г. А. Бочвар и др. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
42. Sieniawski J. Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Two-Phase Titanium Alloys / J. Sieniawski, W. Ziaja, K. Kubiak, M. Motyka // Titanium Alloys: Advances in Properties Control / J. Sieniawski, W. Ziaja. – Rijeka : IntechOpen, 2013. – Гл. 4 – С.69-80.
43. Негодин Д. А., Галкин С. П., Харитонов Е. А. и др. Тестирование технологии радиально-сдвиговой прокатки и предпроектный выбор мини-станов для гибкого производства титановых прутков малых сечений в условиях АО ЧМЗ // Metallurg. – 2018. – №. 11. – С. 40-46.
44. Пат. 2175581 С2 Российская Федерация, МПК В21В 3/00. Способ получения сортового проката из титановых сплавов / Тетюхин В. В., Левин И. В., Душин В. С. и др. ;

заявитель и патентообладатель ОАО Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение. – № 99126228/02 ; заявл. 15.12.1999 ; опубл. 10.11.2001. – 7 с. : ил.

45. Пат. 2390395 С1 Российская Федерация, МПК В21С 23/00. Способ получения прутков с мелкокристаллической глобулярной структурой в α и $\alpha+\beta$ -титановых сплавах / Левин И. В., Смирнов В. Г.; заявитель и патентообладатель Открытое Акционерное Общество "Корпорация ВСМПО-АВИСМА". – № 2009101901/02 ; заявл. 21.01.2009 ; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. – 7 с.

46. Galkin S. P., Gamin Y. V., Aleshchenko A. S., Romantsev B. A. Modern development of elements of theory, technology and mini-mills of radial-shear rolling // *Chernye Metally*. – 2021. – Т. 12. – С. 51-58.

47. Пат. 2644714 С2 Российская Федерация, МПК В21С 37/04, С22F 1/18, В21J 5/00. Способ изготовления прутков из сплавов на основе титана / Волошин А. В., Москалев А. Е., Негодин Д. А. и др. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Чепецкий механический завод" (АО ЧМЗ). – № 2016122145 ; заявл. 22.12.2015 ; опубл. 13.02.2018, Бюл. № 5. – 9 с.

48. А. с. 749459 А1 СССР, МПК В21В 1/02. Способ винтовой прокатки заготовок сплошного круглого профиля / Потапов И. Н., Зимин В. Я., Харитонов Е. А., Романенко В. П. ; заявитель и патентообладатель Московский Ордена Трудового Красного Знамени институт стали и сплавов. – № 2581464 : заявл. 15.02.1978 : опубл. 23.07.1980, Бюл. № 27. – 4 с. : ил.

49. Романцев Б. А., Гончарук А. В., Алещенко А. С. Винтовая прошивка в трубном производстве: учеб. пособие / Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, А. С. Алещенко. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2017. – 262 с.

50. Харитонов Е. А. Исследование винтовой прокатки титановых сплавов : дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Харитонов Евгений Анатольевич. – М., 1980. – 175 с.

51. А. с. 871382 А1 СССР, МПК В21В 1/00. Способ винтовой прокатки / Потапов И. Н., Харитонов Е. А., Минтаханов М. А., Финагин П. М. – № 2899828/02 : заявл. 28.03.1980 : опубл. 10.04.2000, Бюл. № 10. – 1 с.

52. А. с. 786120 А1 СССР, МПК В21В 1/02. Способ винтовой прокатки прутков из малопластичных сталей и сплавов / Полухин П. И., Потапов И. Н., Харитонов Е. А. и др. ; заявитель и патентообладатель Московский ордена Трудового Красного Знамени институт стали и сплавов. – заявл. 04.07.1979 : опубл. 23.08.2023, Бюл. № 24. – 1 с.

53. А. с. 769861 А1 СССР, МПК В21В 1/02. Способ получения сортового проката / Потапов И. Н., Харитонов Е. А., Зимин В. Я. и др. ; заявитель и патентообладатель

Московский ордена Трудового Красного Знамени институт стали и сплавов. – заявл. 18.05.1979 : опубл. 23.08.2023, Бюл. № 24. – 1 с.

54. А. с. 896813 А1 СССР, МПК В21В 19/02. Рабочая клетка стана винтовой прокатки / Минтаханов М. А., Финагин П. М., Потапов И. Н., Харитонов Е. А. – № 2931826/27 : заявл. 28.05.1980 : опубл. 10.04.2000, Бюл. № 10. – 1 с.

55. А. с. 1207035 А1 СССР, МПК В21В 19/02, В21В 13/08. Рабочая клетка стана винтовой прокатки / Минтаханов М. А., Финагин П. М., Потапов И. Н. и др. – № 3748882/02 : заявл. 05.06.1984 : опубл. 27.04.2000, Бюл. № 12. – 3 с. : ил.

56. А. с. 1403447 А1 СССР, МПК В21В 3/00, В21В 19/00. Способ реверсивной винтовой прокатки сплошных круглых заготовок / И. Н. Потапов, П. И. Полухин, С. П. Галкин и др. ; заявитель и патентообладатель Московский институт стали и сплавов. – заявл. 10.06.1986 : опубл. 23.08.2023, Бюл. № 24. – 1 с.

57. А. с. № 1014975 А1 СССР, МПК С22F 1/18. Способ термомеханической обработки титановых сплавов / П. И. Полухин, И. Н. Потапов, О. М. Смирнов и др. ; заявитель Московский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Институт стали и сплавов. – № 3349326 : заявл. 04.11.1981 : опубл. 30.04.1983, Бюл. № 16. – 3 с.

58. Корпорация ВСМПО-АВИСМА и Boeing продлили контракт на поставку титановой продукции на 10 лет // Российский внешнеэкономический вестник. – 2014. – № 2. – С. 126.

59. Корпорация ВСМПО-АВИСМА и Boeing продлили контракт на поставку титановой продукции на 10 лет // Российский внешнеэкономический вестник. – 2014. – № 7. – С. 118-119.

60. Коликов А. П., Зиновьев А. В. К 100-летию научной школы обработки металлов давлением НИТУ "МИСиС" // Сталь. – 2019. – №. 8. – С. 36-42.

61. Skripalenko M. M., Karpov B. V., Rogachev S. O. et al. Simulation of the kinematic condition of radial shear rolling and estimation of its influence on a titanium billet microstructure // materials. – 2022. – Т. 15. – №. 22. – С. 7980.

62. Шубин И. Г., Шубина Н. И. К вопросу формирования качества сортового проката на основе моделирования температурного режима в потоке проволочного стана // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2015. – №. 2 (43). – С. 24-30.

63. Соседкова М. А., Григоренко А. С., Радионова Л. В. Математическая модель расчета температуры металла на стане горячей листовой прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2020. – Т. 18. – №. 4. – С. 24-31.

64. Соседкова М. А., Дубинский Ф. С., Дукмасов В. Г. и др. Моделирование температурных процессов с целью совершенствования технологии сортовой прокатки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2010. – №. 34 (210). – С. 71-75.

65. Скосарь Е. О. Моделирование температурных условий прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане / Е. О. Скосарь, В. А. Шилов, Д. Л. Шварц // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина», г. Екатеринбург, 29 октября - 1 ноября 2012 г. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 645-649.

66. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. / А. Прохоров, М. Лысачев ; под науч. ред. А. Боровкова. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр.

67. Zhang Y., Wang W., Zhang H. et al. Vibration monitoring and analysis of strip rolling mill based on the digital twin model // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Т. 122. – №. 9. – С. 3667-3681.

68. Iskhakov R. V., Gamin Y. V., Kadach M. V. et al. Development of radial-shear rolling mill special stands for continuous cast billets deformation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 966. – №. 1. – С. 012074.

69. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661483 Российская Федерация. Расчет контактной площади поверхности трубной заготовки с валковым инструментом с применением фактора формы при формоизменении прямошовных электросварных труб / Самусев С. В., Фадеев В. А., Будников А. С., Салиба Г. И.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – № 2021660474 : заявл. 02.07.2021 : опубл. 12.07.2021, Бюл. № 7. – 1с.

70. Gamin Y. V., Skugorev A. V., Karashaev M. M. et al. Analysis of Microstructure Evolution of Co-Cr-Mo Alloy during Isothermal Forging // Metals. – 2023. – Т. 13. – №. 9. – С. 1583.

71. Koshmin A., Zinoviev A., Cherkasov S. et al. Finite element modeling and experimental verification of a new aluminum Al-2% Cu-2% Mn alloy hot cladding by flat rolling // Metals. – 2024. – Т. 14. – №. 8. – С. 852.

72. Биба Н. В., Стебунов С. А. QForm – программа, созданная для технологов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – № 9. – С. 38-41.
73. Frank M., Drikakis D., Charissis V. Machine-learning methods for computational science and engineering // *Computation*. – 2020. – Т. 8. – №. 1. – С. 15.
74. Nath D., Ankit, Neog D. R., Gautam S. S. Application of Machine Learning and Deep Learning in Finite Element Analysis: A Comprehensive Review // *Archives of computational methods in engineering*. – 2024. – Т. 31. – №. 5. – С. 2945-2984.
75. Hu Z., Wei Z., Sun H. et al. Optimization of Metal Rolling Control Using Soft Computing Approaches: A Review // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2021. – Т. 28. – №. 2. – С. 405-421.
76. Ogunsanya M. A., Parupelli S. K., Isichei J. C. et al. Predictive quality assurance of material extrusion process using artificial neural networks and ensemble models // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2025. – Т. 140. – №. 5. – С. 2691-2714.
77. Martins J. M. P., Andrade-Campos A., Thuillier S. Comparison of inverse identification strategies for constitutive mechanical models using full-field measurements // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2018. – Т. 145. – С. 330-345.
78. Lourenco R., Andrade-Campos A., Georgieva P. The use of machine-learning techniques in material constitutive modelling for metal forming processes // *Metals*. – 2022. – Т. 12. – №. 3. – С. 427.
79. He L., Wang Z., Akebono H., Sugeta A. Machine learning-based predictions of fatigue life and fatigue limit for steels // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2021. – Т. 90. – С. 9-19.
80. Yang C., Kim Y., Ryu S., Gu G. X. Prediction of composite microstructure stress-strain curves using convolutional neural networks // *Materials & Design*. – 2020. – Т. 189. – С. 108509.
81. Yang Z., Yu C. H., Buehler M. J. Deep learning model to predict complex stress and strain fields in hierarchical composites // *Science Advances*. – 2021. – Т. 7. – №. 15. – С. eabd7416.
82. Hajializadeh F., Ince A. Integration of artificial neural network with finite element analysis for residual stress prediction of direct metal deposition process // *Materials Today Communications*. – 2021. – Т. 27. – С. 102197.

83. Olejarczyk-Woźeńska I., Mrzygłód B., Hojny M. Modelling the high-temperature deformation characteristics of S355 steel using artificial neural networks // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2022. – T. 23. – №. 1. – C. 1-11.
84. Reddy N. S., Lee Y. H., Park C. H., Lee C. S. Prediction of flow stress in Ti-6Al-4V alloy with an equiaxed $\alpha + \beta$ microstructure by artificial neural networks // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – T. 492. – №. 1-2. – C. 276-282.
85. Sabokpa O., Zarei-Hanzaki A., Abedi H. R., Haghdadi N. Artificial neural network modeling to predict the high temperature flow behavior of an AZ81 magnesium alloy // Materials & Design. – 2012. – T. 39. – C. 390-396.
86. Churyumov A., Kazakova A., Churyumova T. Modelling of the steel high-temperature deformation behaviour using artificial neural network // Metals. – 2022. – T. 12. – №. 3. – C. 447.
87. Lin Y. C., Zhang J., Zhong J. Application of neural networks to predict the elevated temperature flow behavior of a low alloy steel // Computational Materials Science. – 2008. – T. 43. – №. 4. – C. 752-758.
88. Ponthot J. P., Kleinermann J. P. A cascade optimization methodology for automatic parameter identification and shape/process optimization in metal forming simulation // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 2006. – T. 195. – №. 41-43. – C. 5472-5508.
89. Mirandola I. et al. Machine learning-based models for the estimation of the energy consumption in metal forming processes // Metals. – 2021. – T. 11. – №. 5. – C. 833.
90. Li D. Y., Peng Y. H., Yin J. L. Optimization of metal-forming process via a hybrid intelligent optimization technique // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2007. – T. 34. – №. 3. – C. 229-241.
91. Wen J., Zou Q., Wei Y. Physics-driven machine learning model on temperature and time-dependent deformation in lithium metal and its finite element implementation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2021. – T. 153. – C. 104481.
92. Yang K., Cao Y., Zhang Y. et al. Self-supervised learning and prediction of microstructure evolution with convolutional recurrent neural networks // Patterns. – 2021. – T. 2. – №. 5.
93. Carneiro M. V., Salis T. T., Almeida G. M., Braga A. P. Prediction of mechanical properties of steel tubes using a machine learning approach // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – T. 30. – №. 1. – C. 434-443.
94. Zhao Y., Song Y., Li F. F., Yan X. L. Prediction of mechanical properties of cold rolled strip based on improved extreme random tree // Journal of Iron and Steel Research International. – 2023. – T. 30. – №. 2. – C. 293-304.

95. Tretyakov D., Biba N., Belugin V. et al. An Ai-Based Approach to Developing a Microstructural Model for Multi-Stage Hot Deformation Processes // *Key Engineering Materials*. – 2026. – Т. 1050. – С. 183-192.
96. Poursina M., Dehkordi N. T., Fattahi A., Mirmohammadi H. Application of genetic algorithms to optimization of rolling schedules based on damage mechanics // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2012. – Т. 22. – С. 61-73.
97. Yang J., Che H. J., Dou F. P., Zhou T. Genetic algorithm-based optimization used in rolling schedule // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2008. – Т. 15. – №. 2. – С. 18-22.
98. Wang D. D., Tieu A. K., De Boer F. G. et al. Toward a heuristic optimum design of rolling schedules for tandem cold rolling mills // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2000. – Т. 13. – №. 4. – С. 397-406.
99. Guo W., Chen R., Jin J. Online eccentricity monitoring of seamless tubes in cross-roll piercing mill // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2015. – Т. 137. – №. 2. – С. 021007.
100. Heidari A., Forouzan M. R. Optimization of cold rolling process parameters in order to increasing rolling speed limited by chatter vibrations // *Journal of Advanced Research*. – 2013. – Т. 4. – №. 1. – С. 27-34.
101. Zhang Y., Wang W., Zhang H. et al. Vibration monitoring and analysis of strip rolling mill based on the digital twin model // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Т. 122. – №. 9. – С. 3667-3681.
102. Tyulenev M., Khoreshok A., Garina E. et al. Adaptive technology of using backhoes for full coal extraction // *Proceedings of the 8th Russian-Chinese Symposium “Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety”*. – Dordrecht : Atlantis Press, 2016. – С. 110-114.
103. ГОСТ 19807–91 Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 9 с.
104. Navid A., Khalilarya S., Abbasi M. Diesel engine optimization with multi-objective performance characteristics by non-evolutionary Nelder-Mead algorithm: Sobol sequence and Latin hypercube sampling methods comparison in DoE process // *Fuel*. – 2018. – Т. 228. – С. 349-367.
105. Li C. Q., Yang W. Essential reliability methods / C. Q. Li, W. Yang // *Time-Dependent Reliability Theory and Its Applications* / C. Q. Li, W. Yang. – Sawston : Woodhead Publishing, 2023. – Гл. 2. – С. 51-119.
106. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – Москва : Федеральное государственное унитарное

предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр "Наука", 1982. – 258 с.

107. ГОСТ 26492–85 Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 31 с.

108. Махмуд Алхаж Али А., Гамин Ю. В., Хакимова А. Н., Кин Т. Ю., Галкин С. П. Влияние температурных условий радиально-сдвиговой прокатки на структуру сплава BT3-1 // *Металлург.* – 2025. – № 2. – С. 65-73.

109. Mahmoud Alhaj Ali A., Khakimova A., Gamin Y. et al. Numerical Analysis and Experimental Verification of Radial Shear Rolling of Titanium Alloy // *Modelling.* – 2025. – Т. 6. – №. 3. – С. 93.

110. Мослех А. Сверхпластическая деформация титановых сплавов с разной исходной микроструктурой : дис. ... канд. техн. наук : 2.6.1 / Мослех Ахмед. – М., 2019. – 207 с.

111. Жерновков С. П., Кальченко В. А., Никулин А. Н. Скоростные условия деформации металла на сортовом стане винтовой прокатки // *Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение».* – 2008. – №. 2. – С. 97-108.

112. Новиков, М. В. Исследование формоизменения для совершенствования режимов деформации и расширения сортаментных возможностей станов винтовой прокатки без направляющего инструмента : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Новиков Михаил Владимирович. – М., 2007. – 158 с.

113. Данилов А.Ф. Горячая прокатка и прессование труб. Изд. 3-е, перераб. и доп. / А.Ф. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – М. : Металлургия, 1972 г. – 576 с.

114. Mahmoud Alhaj Ali A., Khakimova A. N., Zlobin D. A., Kondrat'eva A. A. Analysis of the Cooling of Two-Phase Titanium Alloys: Finite Element Modeling and Experiment // *Steel in Translation.* – 2025. – Т. 55. – №. 9. – С. 985-991.

115. Sert M., Çavdar F., Kanca E. Application of machine learning algorithms in predicting deformation energy and loads acting on the rolls in hot rolling processes // *Canadian Metallurgical Quarterly.* – 2026. – Т. 65. – №. 1. – С. 1009-1026.

116. Prates P. A., Pereira A. F. G. Recent advances and applications of machine learning in metal forming processes // *Metals.* – 2022. – Т. 12. – №. 8. – С. 1342.

117. Marques A. E., Parreira T. G., Pereira A. F. et al. Machine learning applications in sheet metal constitutive Modelling: A review // *International Journal of Solids and Structures.* – 2024. – Т. 303. – С. 113024.

118. Akiba T. Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework / T. Akiba, S. Sano, T. Yanase et al. // Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, Anchorage, AK, USA, 4–8 August 2019 г. – С. 2623-2631.

119. Demin D., Grebenkin I., Barinov A. Forecasting the residual stress components in wires using an artificial neural network // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – С. 1-12.

120. Пат. 2361689 С1 Российская Федерация, МПК В21В 19/04. Способ получения гильз / Брижан А. И., Бодров Ю. В., Грехов А. И. и др. ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Синарский трубный завод" (ОАО "СинТЗ"). – № 2007145344/02 : заявл. 06.12.2007 : опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. – 7 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(а) Макроструктура; (б) Микроструктура переднего (П.К.) и заданного (З.К.) концов прутков:

Рисунок А.1 – Деформированного по базовому режиму прокатки (режим № 2-1)

Р 0,5Р Ц

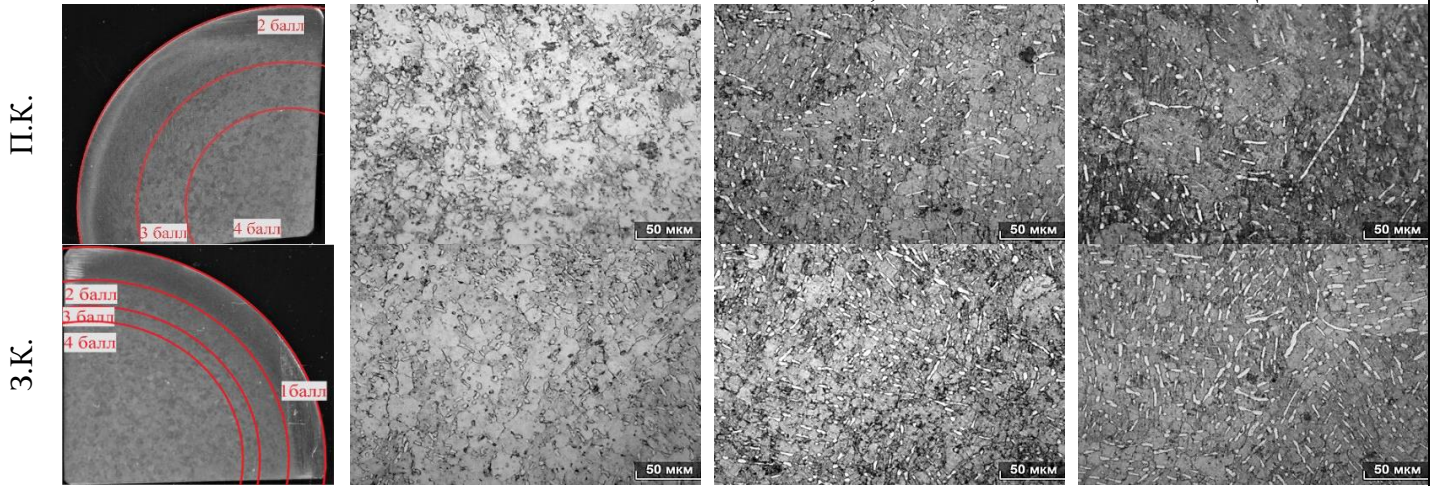


Рисунок А.2 – Деформированного по режиму № 2-2 ($T_0 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Р 0,5Р Ц

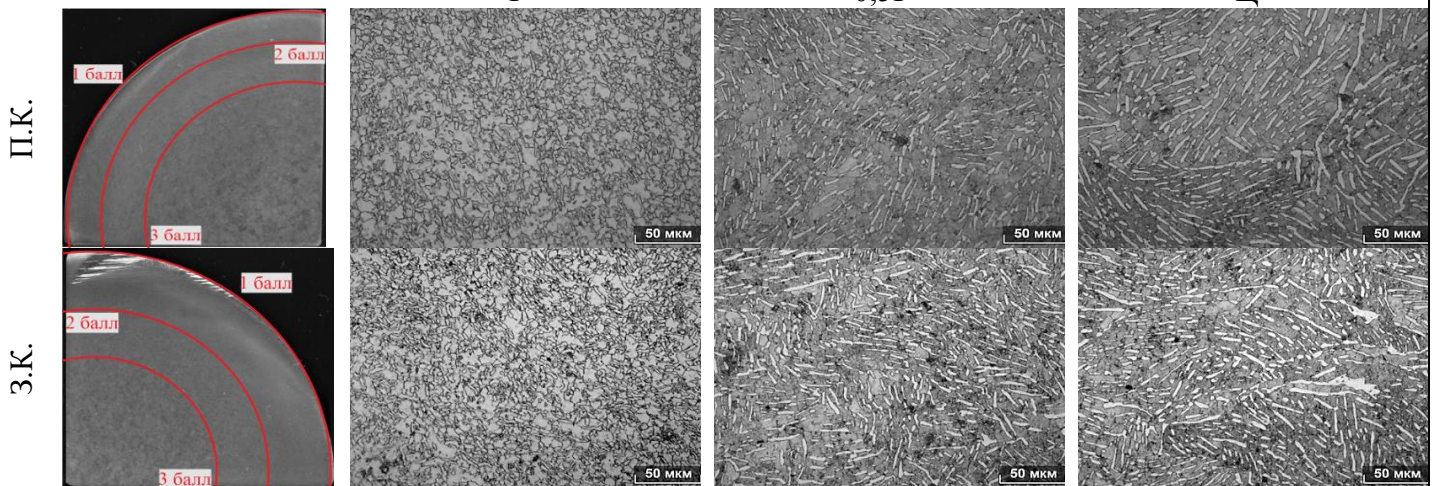


Рисунок А.3 – Деформированного по режиму № 2-3 ($T_0 = 1070\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Р 0,5Р Ц

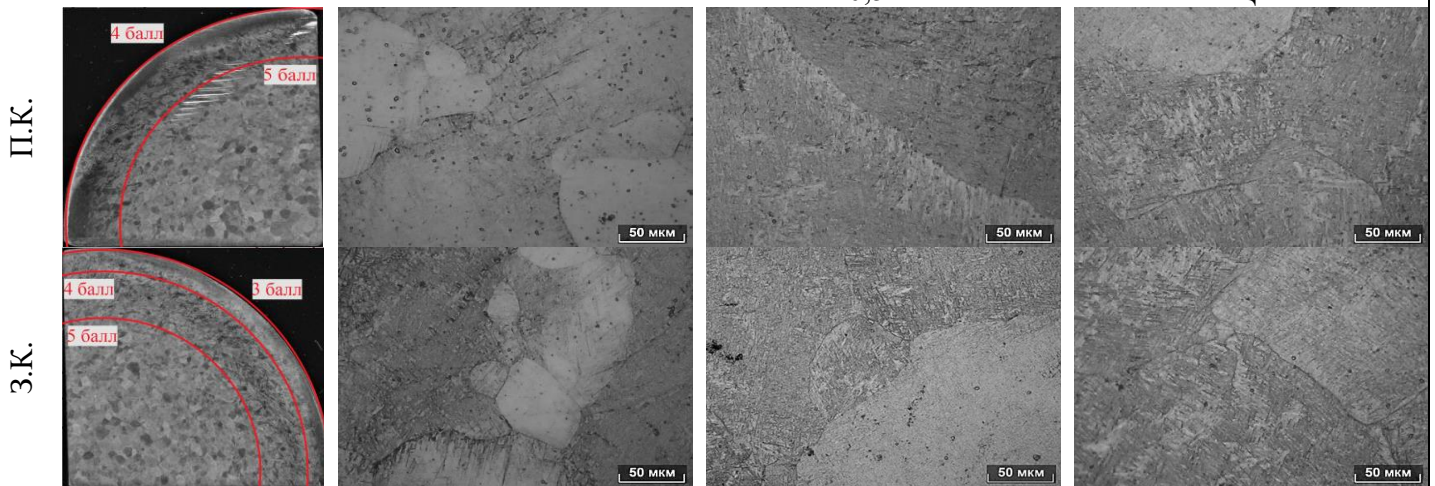


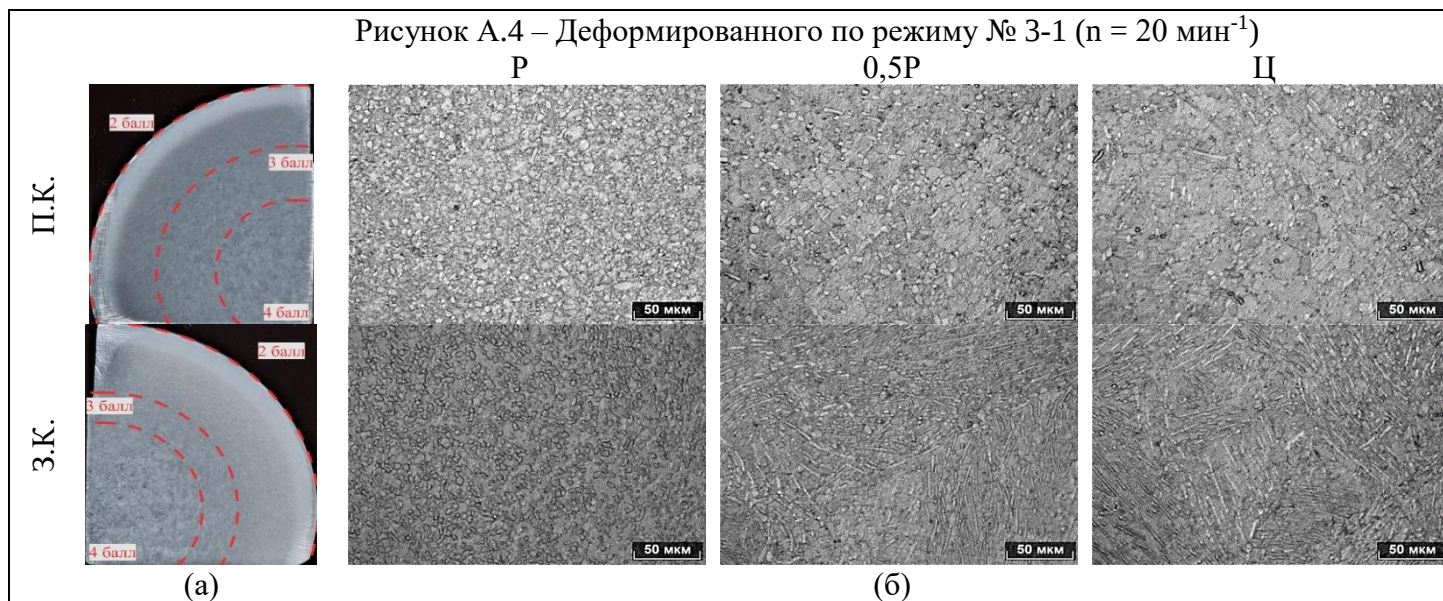
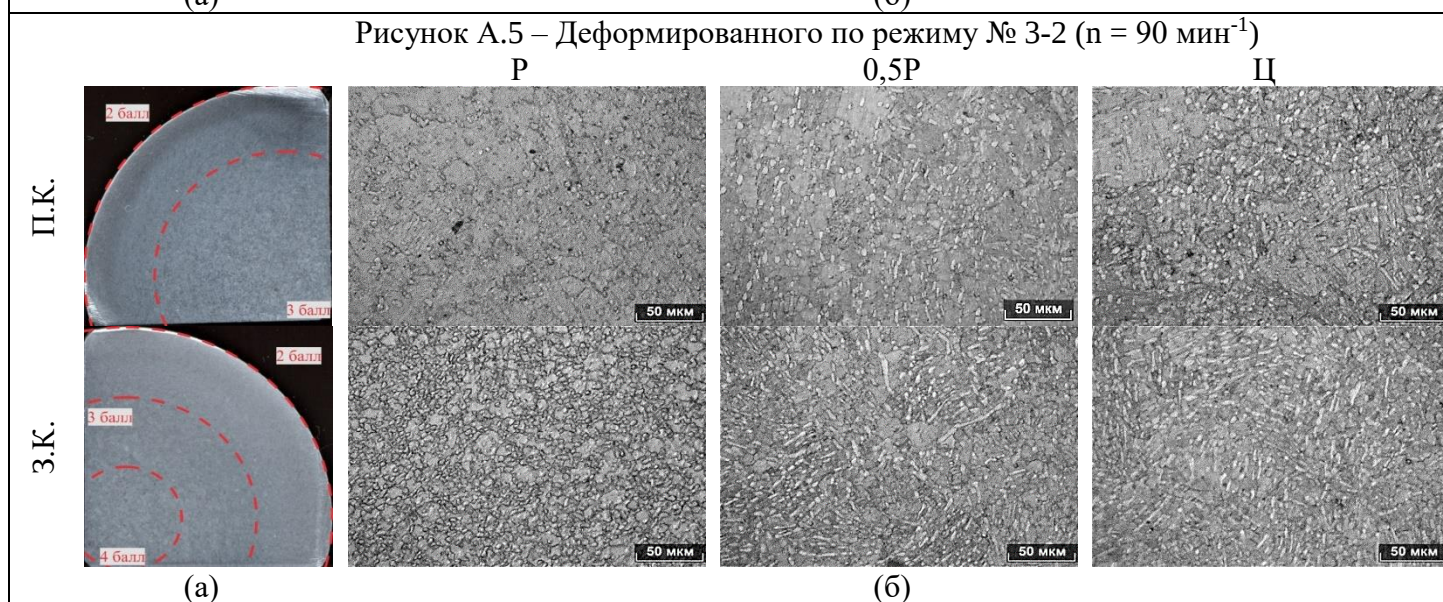
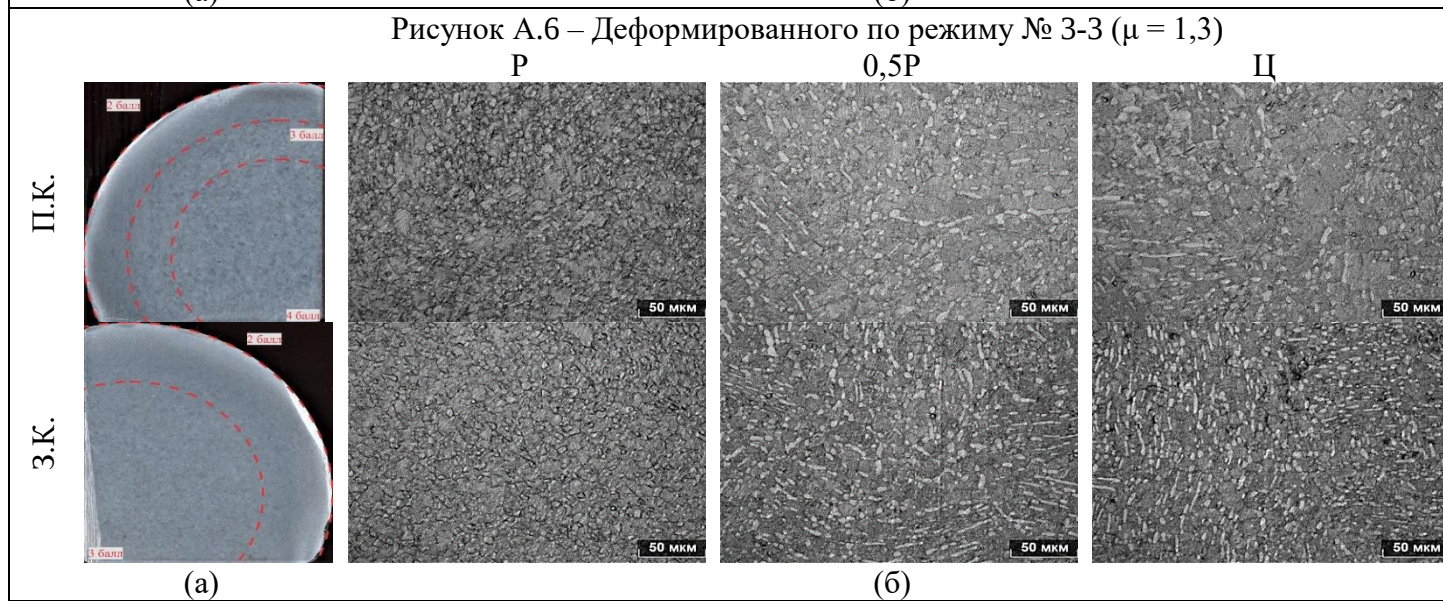
Рисунок А.4 – Деформированного по режиму № 3-1 ($n = 20 \text{ мин}^{-1}$)Рисунок А.5 – Деформированного по режиму № 3-2 ($n = 90 \text{ мин}^{-1}$)Рисунок А.6 – Деформированного по режиму № 3-3 ($\mu = 1,3$)

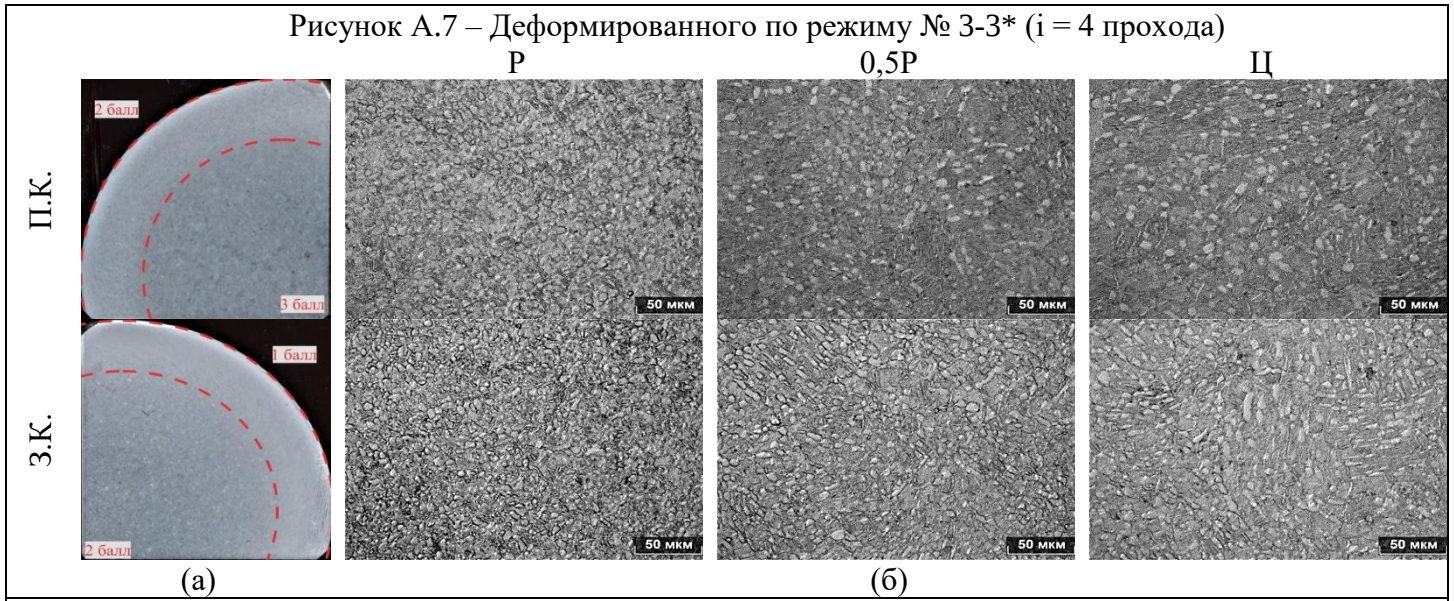
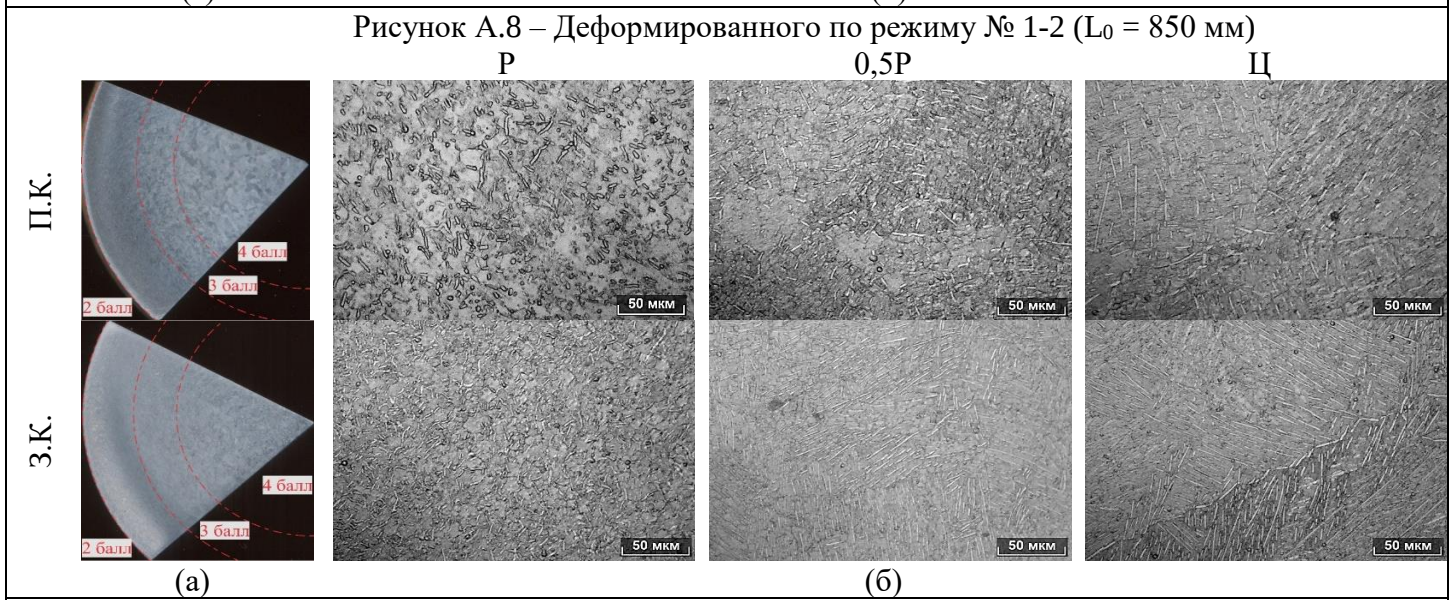
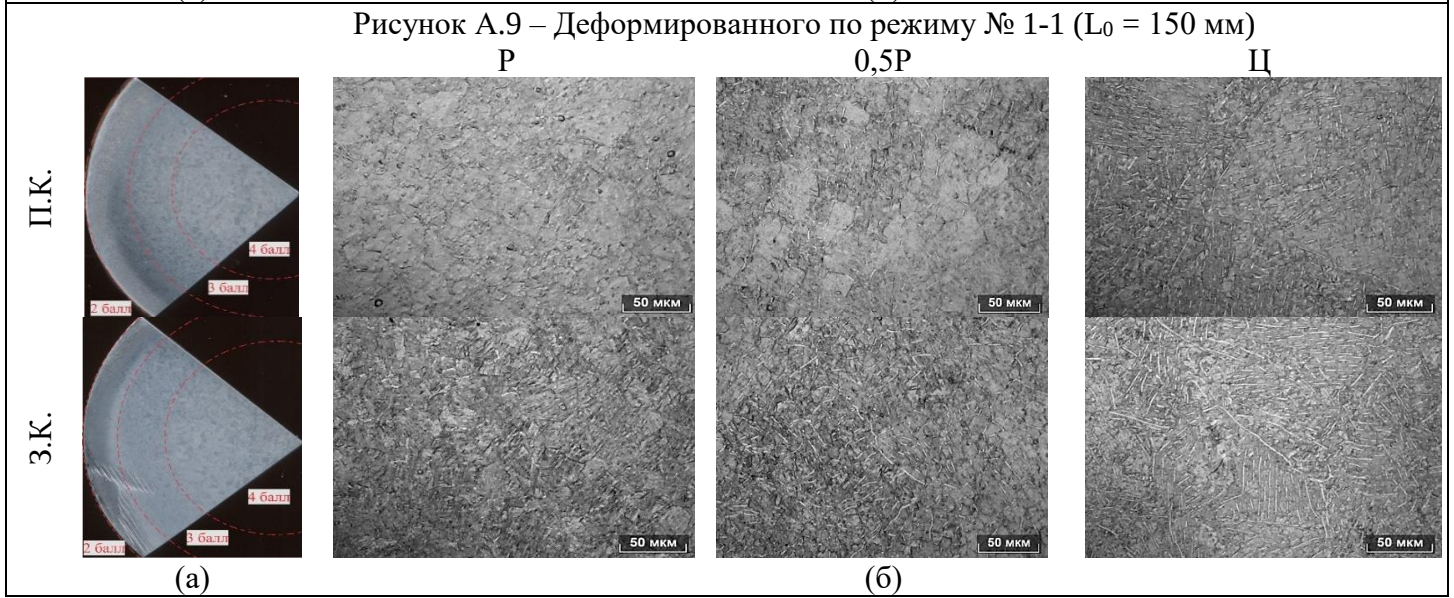
Рисунок А.7 – Деформированного по режиму № 3-3* ($i = 4$ прохода)Рисунок А.8 – Деформированного по режиму № 1-2 ($L_0 = 850$ мм)Рисунок А.9 – Деформированного по режиму № 1-1 ($L_0 = 150$ мм)

Рисунок А.10 – Деформированного по режиму № 2-3-1

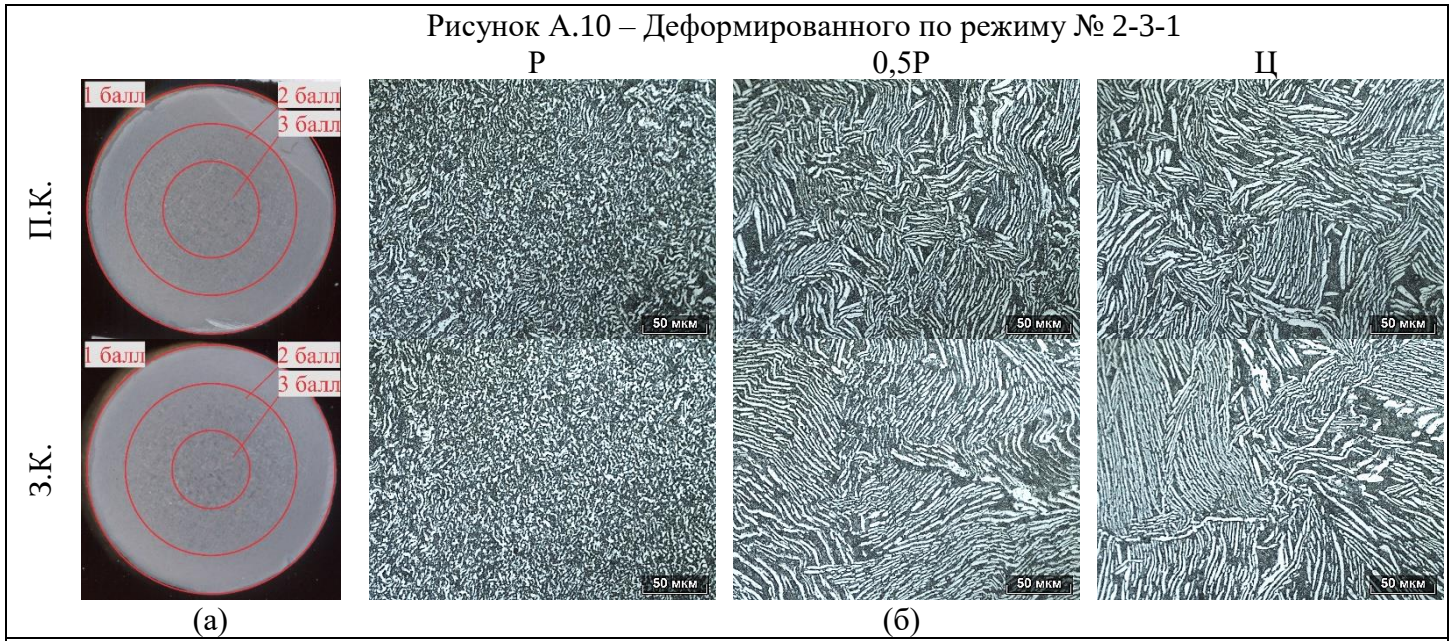


Рисунок А.11 – Деформированного по режиму № 2-2-1

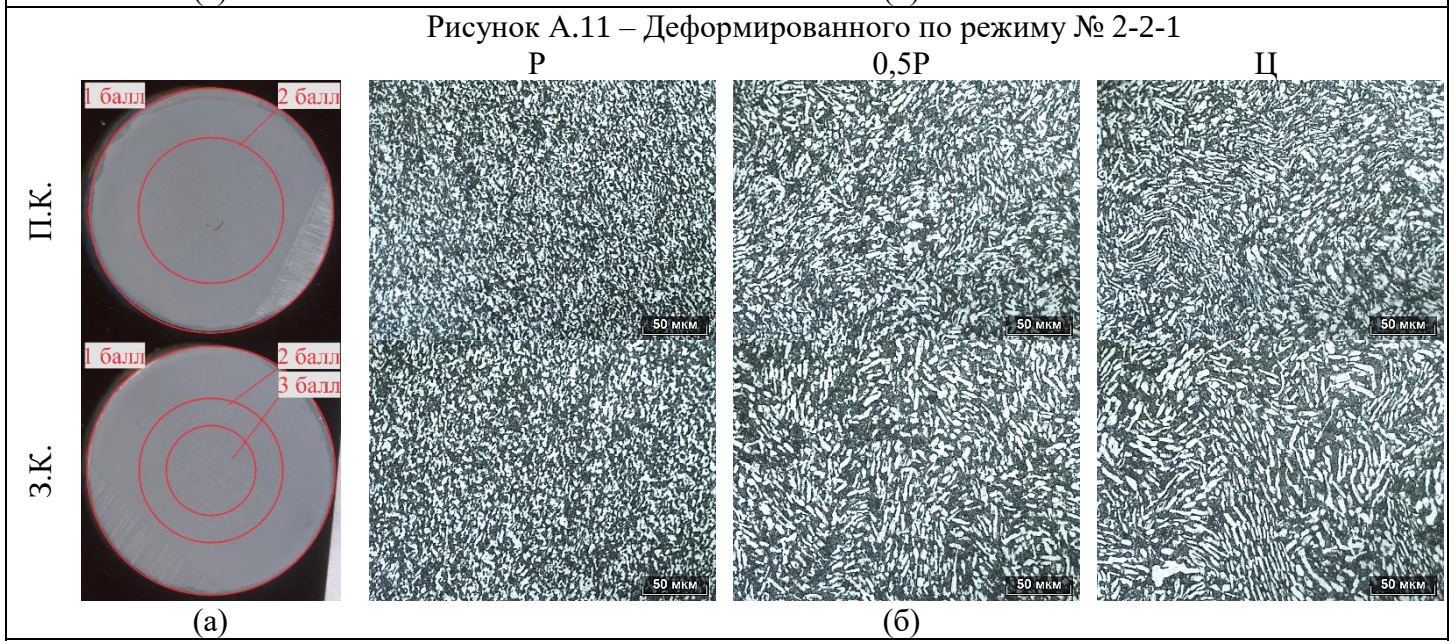


Рисунок А.12 – Деформированного по режиму № 2-1-1

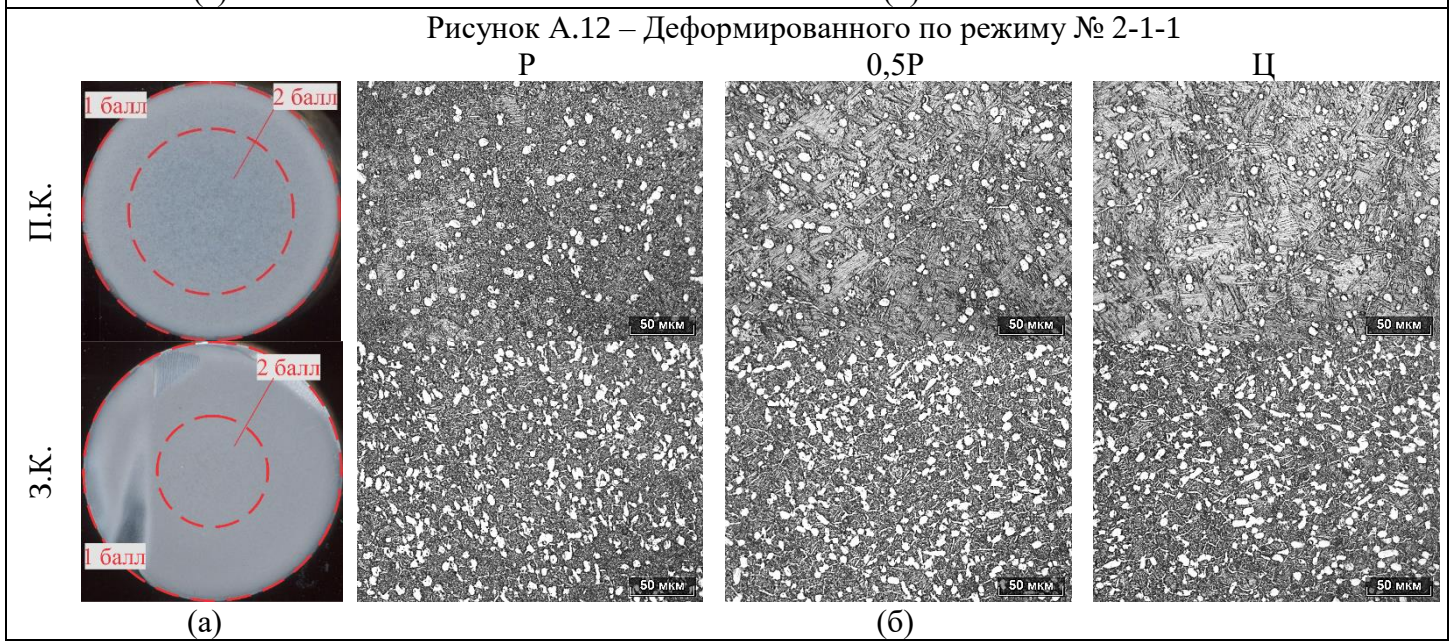


Рисунок А.13 – Деформированного по режиму № 3-1-1

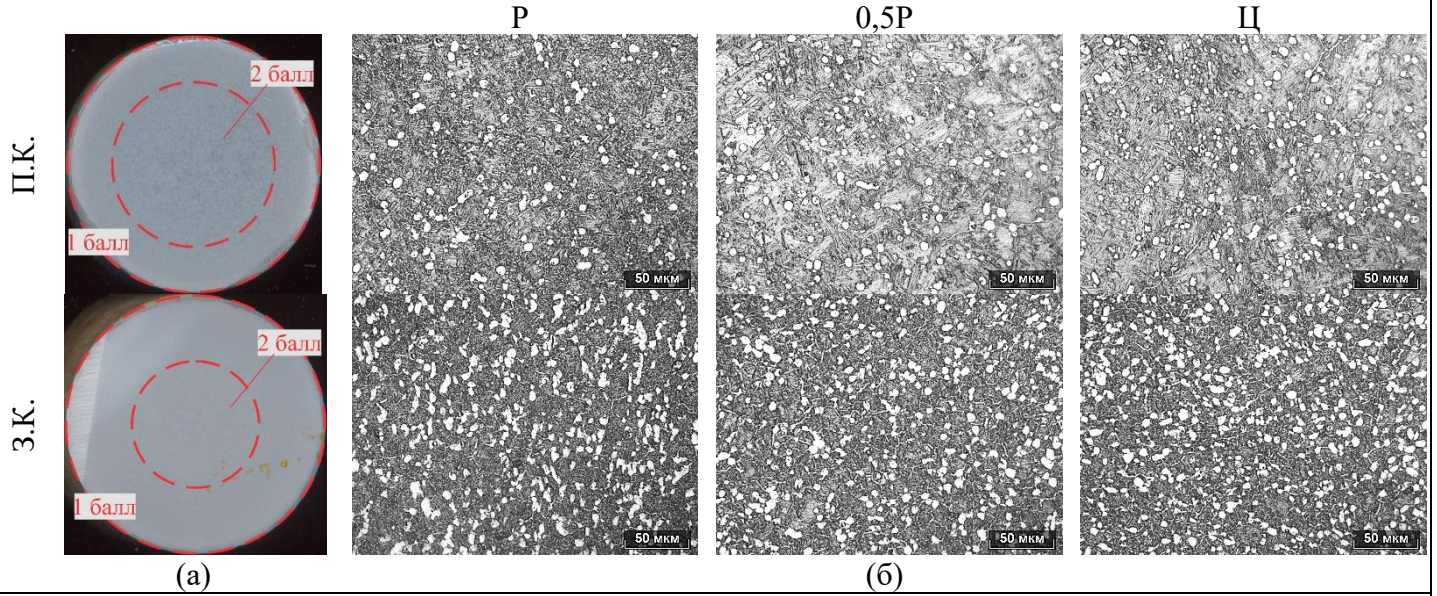


Рисунок А.14 – Деформированного по режиму № 3-2-1

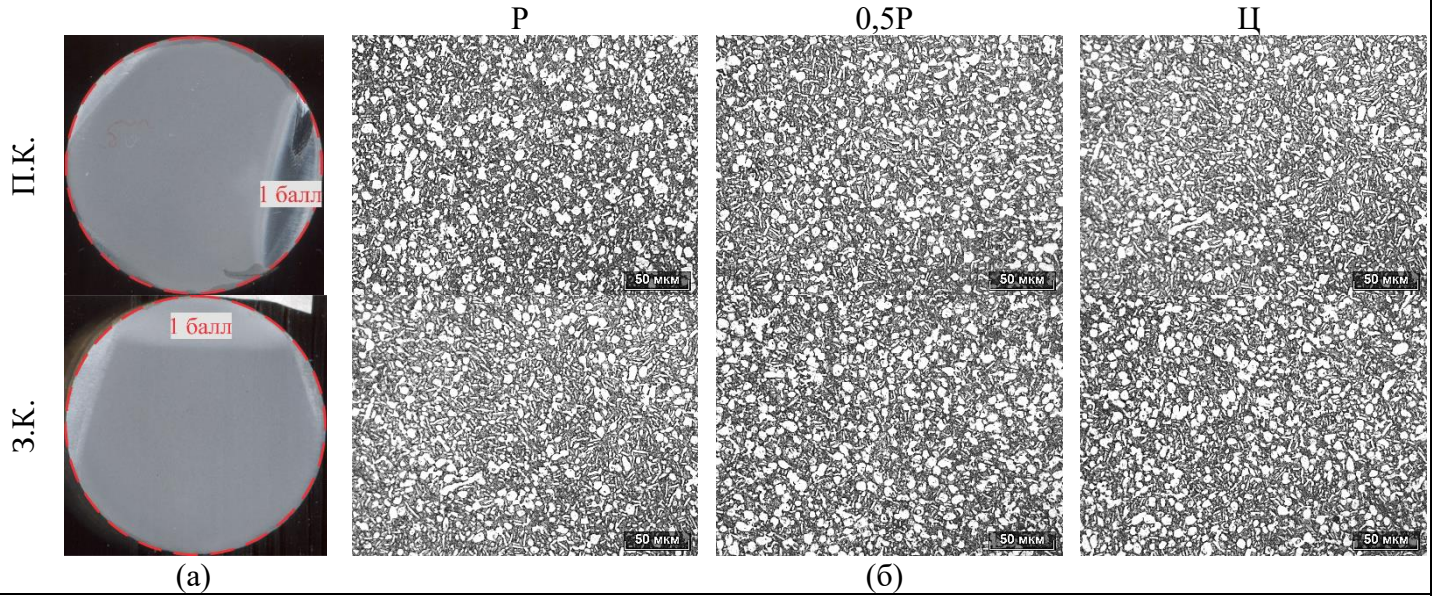


Рисунок А.15 – Деформированного по режиму № 3-3*-1

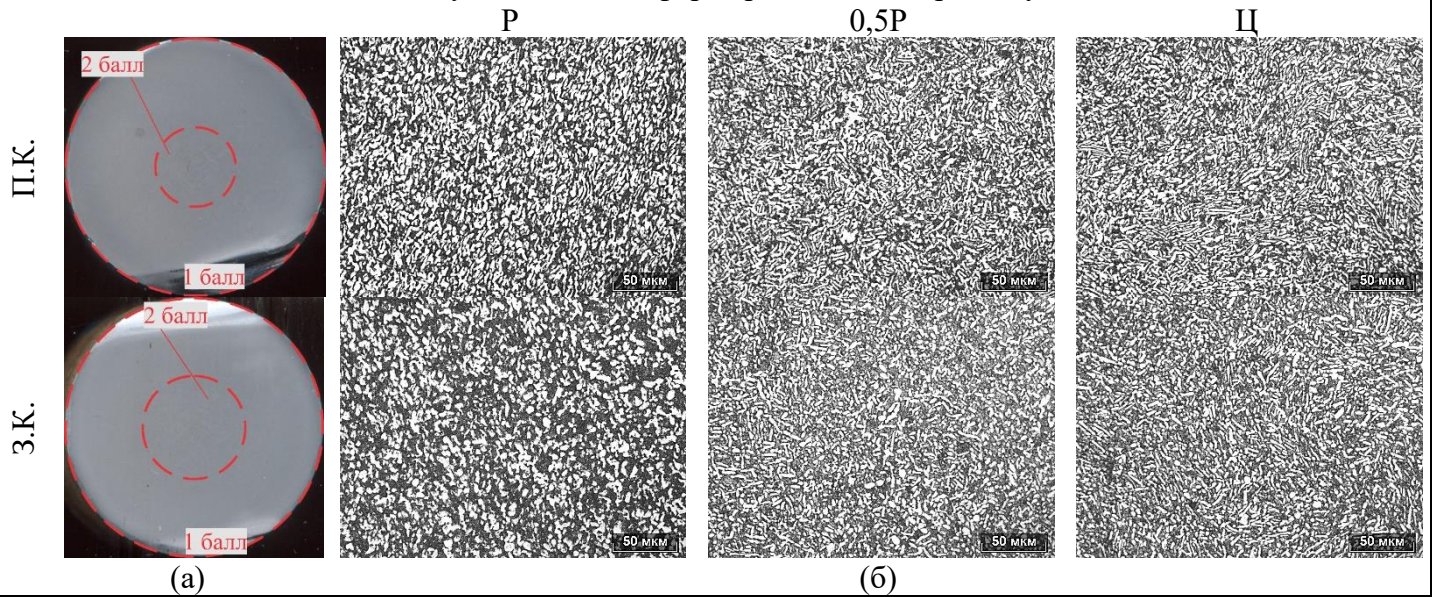


Рисунок А.16 – Деформированного по режиму № 1-2-1

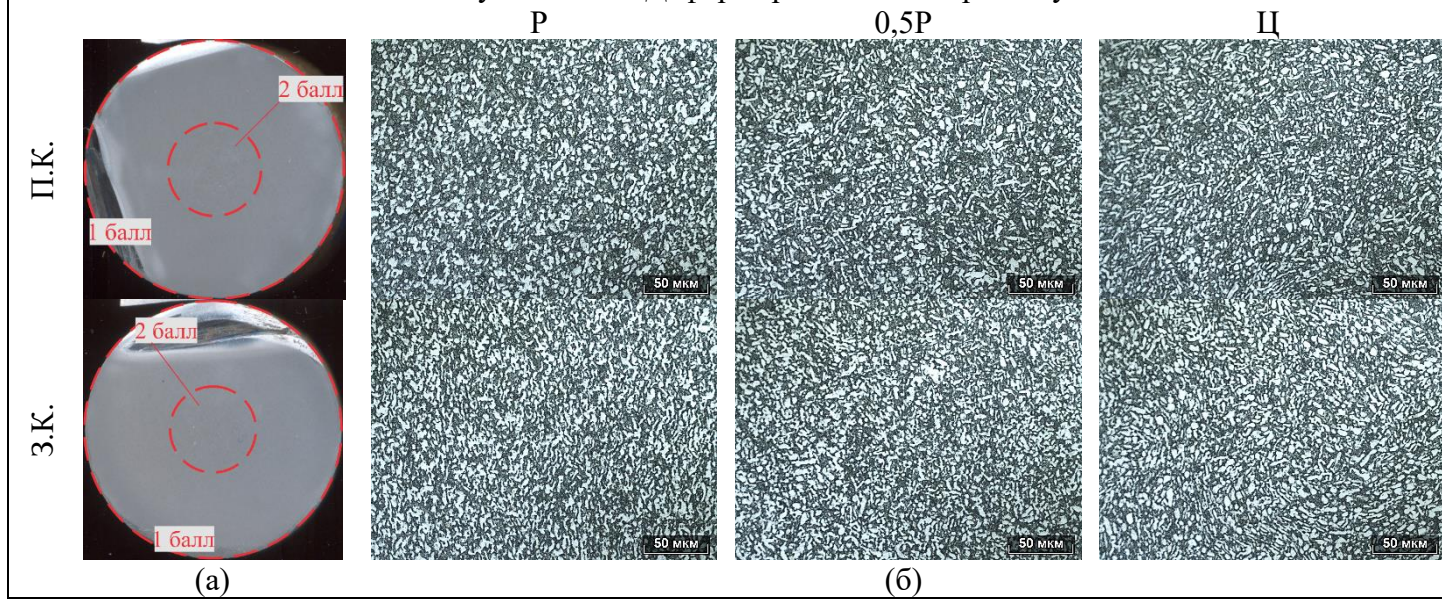
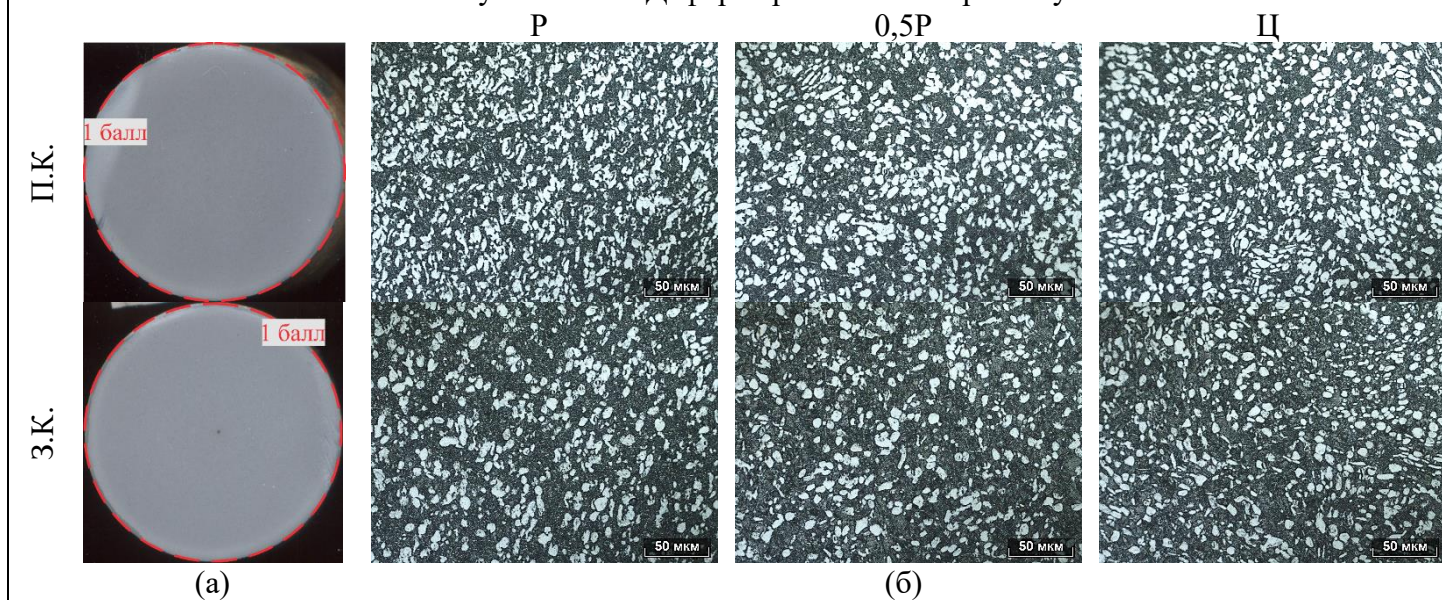


Рисунок А.17 – Деформированного по режиму № 1-2-2



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Данные для верификации ЦМ

Рисунок Б.1 – Формы утяжек прутков, полученных в экспериментах (эксп.) и при моделировании (симул.) второго этапа прокатки

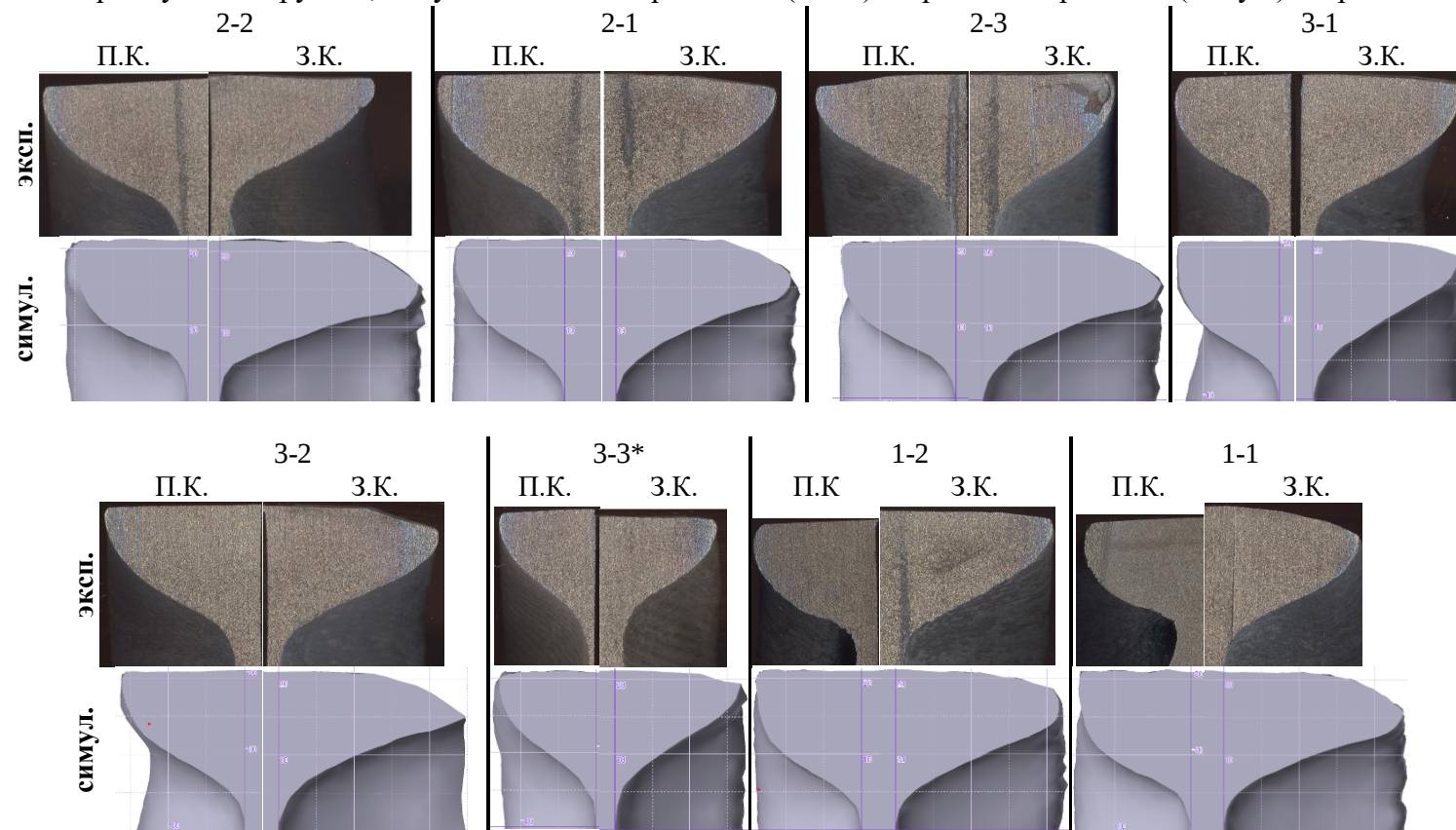


Таблица Б.1 – Сравнение длины прутка, временных параметров прокатки и температуры поверхности прутка в моделировании и эксперименте третьего этапа прокатки

№ режима	№ прохода	Длина прутка				Время прокатки				Температура поверхности прутка			
		эксп., мм	симул., мм	$\Delta_{\text{абс.}}, \text{ мм}$	$\Delta_{\text{отн.}}, \%$	эксп., с	симул., с	$\Delta_{\text{абс.}}, \text{ с}$	$\Delta_{\text{отн.}}, \%$	эксп., °С	симул., °С	$\Delta_{\text{абс.}}, \text{ °С}$	$\Delta_{\text{отн.}}, \%$
2-3-1	1	852,7**	852,1	0,6	0,07	12,09	11,88	0,21	1,80	989,3	989,6	0,3	0,03
	2	1581,1**	1583,8	2,7	0,17	19,67	21,10	1,43	6,78	931,3	913,3	18,0	1,97
	3	2400,0	2248,3	151,7	6,75	27,27	23,34	3,93	16,84	927,5	894,1	33,4	3,74
	4	1393,0	1324,5	68,5	5,17	17,56	13,23	4,34	32,78	865,2	866,2	1,0	0,12
2-2-1	1	559,6**	559,8	0,2	0,04	8,54	7,26	1,28	17,63	903,2	902,5	0,7	0,08
	2	666,3**	679,0	12,7	1,87	9,63	9,44	0,19	2,01	895,2	889,8	5,4	0,61
	3	826,7**	849,1	22,4	2,64	11,79	9,98	1,82	18,20	910,0	903,5	6,5	0,72
	4	957,4**	984,7	27,3	2,77	13,33	11,57	1,76	15,21	878,5	886,4	7,9	0,89
	5	1180,2**	1224,6	44,4	3,63	14,49	13,20	1,29	9,77	884,6	890,9	6,3	0,71
	6	1375,0**	1438,5	63,5	4,41	19,84	15,00	4,84	32,27	874,7	888,6	13,9	1,56
	7	1622,3**	1716,0	93,7	5,46	19,77	17,23	2,55	14,78	878,1	884,4	6,3	0,71
	8	2140,0	2095,3	44,7	2,13	23,93	22,14	1,79	8,08	856,8	877,3	20,5	2,34
	9	1172,1**	1277,6	105,5	8,26	14,79	13,12	1,68	12,77	880,9	887,0	6,1	0,69
	10	1450,0	1442,5	7,5	0,52	17,56	14,25	3,32	23,27	850,4	869,5	19,1	2,20
2-1-1	1	820,0	799,4	20,6	2,58	10,90	11,51	0,61	5,31	956,70	962,90	6,2	0,64
	2	1580,0	1552,9	27,1	1,75	19,37	17,94	1,43	7,96	984,90	966,10	18,8	1,95
	3	2365,0	2223,0	142,0	6,39	27,75	22,96	4,80	20,89	939,80	906,90	32,9	3,63
3-1-1	1	780,0	741,0	39,0	5,26	21,40	21,10	0,30	1,44	916,50	928,30	11,8	1,27
	2	1525,0	1398,3	126,7	9,06	19,37	18,32	1,05	5,73	987,20	1000,00	12,8	1,28
	3	2280,0	2114,9	165,1	7,81	19,64	15,28	4,37	28,58	987,20	976,20	11,0	1,13
3-2-1	1	810,0	779,2	30,8	3,95	11,60	11,39	0,21	1,88	948,00	955,70	7,7	0,81
	2	1560,0	1480,4	79,6	5,38	17,69	17,51	0,18	1,03	977,50	972,80	4,7	0,48
	3	1730,0	1696,5	33,5	1,97	21,35	17,34	4,01	23,13	867,00	882,40	15,4	1,75
	4	1590,0	1612,0	22,0	1,37	19,34	16,33	3,01	18,43	868,50	886,30	17,8	2,01
	5	1800,0	1839,8	39,8	2,16	24,73	15,68	9,05	57,72	848,40	875,80	27,4	3,13

** Значения получены расчетным путем.

Продолжение таблицы Б.1

3-3*-1	1	470,0	447,7	22,3	4,98	6,43	6,00	0,43	7,22	920,60	934,50	13,9	1,49
	2	660,0	653,7	6,3	0,96	8,47	8,52	0,05	0,59	930,50	924,10	6,4	0,69
	3	960,0	943,0	17,0	1,80	12,23	10,94	1,29	11,79	935,20	925,80	9,4	1,02
	4	1350,0	1323,1	26,9	2,03	16,60	14,53	2,07	14,25	919,60	910,70	8,9	0,98
	5	1950,0	1922,4	27,6	1,44	23,17	21,05	2,12	10,07	906,00	898,90	7,1	0,79
1-2-1	1	1980,0	1897,0	83,0	4,38	26,81	25,10	1,72	6,83	930,60	941,50	10,9	1,16
	2	1390,0	1373,1	16,9	1,23	18,18	17,57	0,61	3,47	938,60	950,20	11,6	1,22
	3	1890,0	1854,8	35,2	1,90	44,79	40,57	4,22	10,41	873,10	894,70	21,6	2,41
	4	2160,0	2165,8	5,8	0,27	54,61	27,37	27,24	99,55	876,20	892,30	16,1	1,80
	5	2590,0	2612,0	22,0	0,84	60,09	50,37	9,72	19,30	835,70	847,80	12,1	1,43
1-2-2	1	1980,0	1897,0	83,0	4,38	26,81	25,10	1,72	6,83	930,60	941,50	10,9	1,16
	2	1415,0	1374,4	40,6	2,96	18,18	18,28	0,10	0,55	943,50	942,90	0,6	0,06
	3	1905,0	1847,1	57,9	3,14	14,46	13,32	1,14	8,56	927,70	914,00	13,7	1,50
	4	2170,0	2111,0	59,0	2,79	18,87	17,98	0,89	4,95	910,00	922,70	12,7	1,38
	5	2630,0	2564,8	65,2	2,54	21,17	18,60	2,57	13,82	903,60	903,00	0,6	0,07

Таблица Б.2 – Измерения диаметров, полученные при моделировании и эксперименте третьего этапа прокатки

№ режима	D _{эксп.} , мм		D _{симул.} , мм		ΔD _{абс.} , мм		ΔD _{отн.} , %		a _{эксп.} , %		a _{модел.} , %	
	П.К.	З.К.	П.К.	З.К.	П.К.	З.К.	П.К.	З.К.	П.К.	З.К.	П.К.	З.К.
2-3-1	18,03	18,23	18,61	18,42	0,59	0,19	3,14	1,03	0,28	0,27	2,36	0,16
2-2-1	17,73	18,08	17,99	18,01	0,27	0,07	1,47	0,36	0,28	0,28	0,56	0,33
2-1-1	18,43	18,73	19,29	19,03	0,87	0,31	4,48	1,60	0,27	0,27	0,62	0,53
3-1-1	18,40	18,65	18,84	18,63	0,44	0,02	2,31	0,13	1,09	0,54	0,27	0,81
3-2-1	18,40	18,68	18,47	18,44	0,07	0,24	0,35	1,30	1,09	0,27	0,60	0,27
3-3*-1	19,20	18,53	18,45	18,29	0,75	0,24	4,09	1,31	0,52	0,27	0,16	0,27
1-2-1	18,58	18,95	18,84	18,56	0,26	0,39	1,38	2,10	0,27	0,53	0,16	0,54
1-2-2	18,28	18,00	18,73	18,73	0,45	0,73	2,40	3,87	0,27	0,56	0,37	0,59

ПРИЛОЖЕНИЕ В

QUANTORFORMПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

ООО «КванторФорм» | 115088, Москва, а/я 74, Россия | тел./факс: +7 (499) 643-04-53

www.qform3d.ru | sales@qform3d.ru

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Махмуда Алхажа Али Абдуллы на тему «**Комплексное исследование и совершенствование термодеформационных режимов радиально-сдвиговой прокатки прутков из титановых сплавов на основе конечно-элементного моделирования**»

Настоящий Акт подтверждает использование отдельных результатов и научно-технических положений, разработанных в диссертационной работе Махмуда Алхажа Али Абдуллы, посвященной совершенствованию термодеформационных режимов процесса РСП титановых сплавов на основе конечно-элементного моделирования в деятельности ООО «КванторФорм».

В частности используются:

- параметры верифицированной модели QForm, обеспечивающие получение результатов конечно-элементного моделирования с отклонением от экспериментальных данных, не превышающих 10%;
- данные о термо-деформационном состоянии заготовки в ходе процесса радиально-сдвиговой прокатки и ее структурных характеристиках после прокатки, которые использованы в качестве основы для обучения модели машинного обучения в программе AI Model Maker.

Использование перечисленных выше результатов, представляющих научно-практический интерес, позволит повысить эффективность прогнозирования характеристик проката на основе заданных параметров процесса прокатки.

Директор по развитию
ООО «КванторФорм», к.т.н.



Ю.А. Гладков
29.07.2026

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УТВЕРЖДАЮ
 Директор Института
 экотехнологий и инжиниринга
 НИТУ МИСИС
 А.Я. Травянов
 « 29 » июня 2026 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы Махмуда Алхажа Али Абдуллы в учебный процесс на кафедре обработки металлов давлением (ОМД) НИТУ МИСИС

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационного исследования Махмуда Алхажа Али А. на тему «Комплексное исследование и совершенствование термо-деформационных режимов радиально-сдвиговой прокатки прутков из титановых сплавов на основе конечно-элементного моделирования», выполненного на кафедре ОМД НИТУ МИСИС под руководством к.т.н., доцента Гамина Юрия Владимировича, внедрены в учебный процесс по направлениям подготовки студентов бакалавриата (15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 22.03.02 «Металлургия») и магистратуры (22.04.02 «Металлургия»). Материалы применяются при проведении лабораторных и практических занятий, а также выполнении курсовых работ и проектов в рамках курсов «Современные технологические решения в деформационной обработке металлов и сплавов», «Компьютерное проектирование процессов и технологий ОМД», «Технологические процессы пластической обработки металлов и сплавов».

Зав. кафедрой ОМД

Ученый секретарь кафедры ОМД

Научный руководитель, доцент

А.С. Алещенко
 Т.Ю. Сидорова
 Ю.В. Гамин