УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной и
инновационной работе
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
д.т.н., профессор
О.Н. Тулупов
«16» 10 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Махмуд Алхаж Али Абдуллы

«Комплексное исследование и совершенствование термо-деформационных режимов радиально-сдвиговой прокатки прутков из титановых сплавов на основе конечно-элементного моделирования», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Актуальность темы диссертации

Современное развитие высокотехнологичных отраслей промышленности предъявляет повышенные требования к деформированным полуфабрикатам из титановых сплавов, в том числе к стабильности их структуры и фазового состояния, точности геометрических характеристик и воспроизводимости температурно-деформационных условий обработки. Особую сложность представляет получение длинномерных прутков малого и среднего диаметра из двухфазных α+β-титановых сплавов, для которых даже относительно небольшие изменения температуры и степени деформации способны приводить к существенному изменению формируемой микро- и макроструктуры.

Актуальность рассматриваемой в диссертации задачи определяется также необходимостью повышения управляемости процесса радиально-сдвиговой прокатки (РСП), характеризующегося сложным напряженно-деформированным и температурным состоянием металла. При прокатке прутков малого диаметра существенное значение приобретает охлаждение поверхности и возникновение продольной и поперечной неоднородности температурного поля. При увеличении длины заготовки указанные эффекты усиливаются, что затрудняет обеспечение стабильного структурного состояния по длине готового прутка.

Диссертация Махмуд Алхаж Али Абдуллы направлена на решение обозначенной задачи применительно к промышленному двухфазному титановому сплаву ВТ3-1. Автором предложен комплексный подход, сочетающий

экспериментальное исследование РСП на опытно-промышленных станах, разработку системы мониторинга технологических параметров, металлографический анализ, конечно-элементное моделирование в QForm 3D, многофакторный компьютерный эксперимент и методы машинного обучения для оперативного прогнозирования температурно-деформационных параметров процесса. Такой подход отвечает современному направлению цифровизации технологий обработки металлов давлением и имеет научно-техническую значимость для совершенствования РСП титановых сплавов.

Таким образом, диссертационная работа посвящена актуальной научно-технической задаче, связанной с установлением закономерностей формирования температурно-деформационного состояния и структуры прутков из сплава ВТ3-1 при РСП и разработкой на этой основе рациональных технологических режимов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 148 страницах и включает введение, пять глав, заключение и общие выводы, список использованных источников из 120 наименований и 4 приложения. Работа содержит 77 рисунков и 25 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, приведены положения научной новизны и практической значимости, методы исследований, основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации, публикациях, достоверности и личном вкладе автора.

В первой главе выполнен анализ факторов, определяющих качество и точность прутков при РСП, рассмотрены особенности формирования температурного поля и скоростных параметров процесса, современные системы контроля температуры, особенности структурообразования двухфазных титановых сплавов и применение цифровых моделей и методов машинного обучения в прокатном производстве. Обоснован выбор сплава ВТ3-1 как объекта исследования и сформулирована необходимость разработки расчетного инструмента для совершенствования режимов РСП, прежде всего для прутков малого диаметра и большой длины.

Вторая глава посвящена разработке методики экспериментального исследования и постановке задач. Исследования выполнены на опытно-промышленных трехвалковых станах МИСиС-130Т, МИСиС-100Т и министане 14-40. Разработана система мониторинга на базе ИК-пирометров, системы SCADA, устройств регистрации токовой нагрузки и параметров привода. Выполнена экспериментальная тарировка пирометров для сплавов ВТ3-1 и ВТ6, после чего сформирован план эксперимента с варьированием температуры нагрева, коэффициента вытяжки, частоты вращения валков и геометрических параметров заготовки.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования температуры, формоизменения, макро- и микроструктуры прутков из сплава ВТ3-1, а

также нагрузок и скоростных параметров процесса РСП. Показано влияние температуры, коэффициента вытяжки, количества проходов и частоты вращения валков на проработку осевой зоны и степень структурной неоднородности. Установлено, что для длинномерных прутков целесообразно рассматривать скоростной режим как дополнительный инструмент управления температурным состоянием металла. Определены рациональные сочетания температуры и деформационных параметров, обеспечивающие более равномерное структурное состояние.

В четвертой главе разработана и верифицирована конечно-элементная модель процесса РСП в QForm3D v11. Модель учитывает температурную зависимость теплофизических и реологических характеристик материала, контактный теплообмен, трение и тепловыделение при пластической деформации. Верификация выполнена по машинному времени, геометрическим характеристикам и температуре поверхности прутка. Для исследованных режимов расчетные и экспериментальные данные характеризуются высокой степенью соответствия; относительные отклонения по основным критериям оценки точности не превышают 10 %. На основе модели проведен многофакторный компьютерный эксперимент и количественно установлено влияние длины заготовки, скорости прокатки и начальной температуры на температурное поле прутка.

В пятой главе сформирована основная технологическая часть работы. На основе 59 экспериментально исследованных режимов прокатки и результатов МКЭ моделирования сформирован массив данных для обучения регрессионных моделей машинного обучения. Исследованы модели RandomForest, ExtraTrees, GradientBoosting, XGBoost, LightGBM и SVR с оптимизацией гиперпараметров посредством Optuna. Разработана предиктивная модель для оперативного определения конечной температуры и накопленной степени деформации, а также предложена стратегия управления частотой вращения валков по текущей температуре прутка. Показано, что ступенчатое регулирование скорости в диапазоне 60…120 об/мин позволяет повысить среднюю температуру прутка на выходе на 22…38 °C и сократить машинное время прокатки на 31…44 % по сравнению с постоянной скоростью. Сформулированы рекомендации по температурным, деформационным и скоростным режимам РСП сплава ВТ3-1.

Диссертационная работа отличается последовательностью построения исследования и логической взаимосвязью между экспериментальной и расчетной частями. Полученные экспериментальные данные используются для верификации и проверки цифровой модели, результаты моделирования – для многофакторного анализа и формирования набора данных для машинного обучения, а совокупность расчетных и экспериментальных результатов непосредственно связана с разработанными технологическими рекомендациями.

Научная новизна работы

- получен и систематизирован значительный массив экспериментальных и расчетных данных о температурных, деформационных, скоростных и структурных параметрах процесса РСП прутков из сплава ВТ3-1 диаметром 18…60 мм;

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

- разработана и верифицирована конечно-элементная модель процесса РСП, обеспечивающая воспроизведение температурного поля, формоизменения, геометрических и временных характеристик процесса с относительной погрешностью не более 10 % для исследованных условий;

- впервые на основе более 90 расчетных вариантов и методов машинного обучения создана предиктивная модель температурно-деформационных параметров РСП прутков из сплава ВТ3-1, позволяющая оперативно прогнозировать температуру и накопленную степень деформации по сечению и длине прутка;

- установлено, что управляемое повышение частоты вращения валков в диапазоне 60…120 об/мин в ходе прокатки может использоваться для регулирования температурного поля длинномерных прутков малого диаметра, повышения температуры заднего конца и сокращения машинного времени прокатки на 31…44 %;

- на основе совокупности экспериментальных и расчетных результатов обоснованы рациональные температурно-деформационные и скоростные режимы РСП сплава ВТ3-1, обеспечивающие формирование равномерной мелкозернистой макроструктуры и требуемых типов микроструктуры.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертационной работы определяется возможностью использования полученных результатов для совершенствования действующих и перспективных технологий радиально-сдвиговой прокатки двухфазных титановых сплавов. Разработанная и апробированная система мониторинга обеспечивает оперативную регистрацию температуры поверхности прутка, частоты вращения валков, машинного времени и токовой нагрузки и создает предпосылки для реализации управления приводом по обратной связи.

Важным практическим результатом является разработанная предиктивная модель, позволяющая быстро оценивать температурно-деформационные параметры без проведения полного численного расчета для каждого технологического варианта. Предложенный подход может быть использован в задачах предварительного выбора и оперативной корректировки режимов РСП, в том числе при переходе к автоматизированному управлению технологическим процессом.

Практическую ценность имеют также установленные рациональные интервалы температур и коэффициентов вытяжки. Для формирования мелкозернистой макроструктуры с 1…2 баллом и глобулярной или переходной микроструктуры автор рекомендует выполнять основную часть деформации в α+β-области при температурах 930…980 °С; рациональный коэффициент вытяжки за проход для соответствующих условий составляет 1,2…1,5, а суммарный коэффициент вытяжки для проработки центральной зоны исходной заготовки диаметром 95 мм должен составлять не менее 5,0…7,0.

Полученные результаты имеют практическое значение для технологических подразделений предприятий, занимающихся производством и обработкой деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов, а также для научно-исследовательских организаций и образовательных учреждений, ведущих работы в области обработки металлов давлением, численного моделирования и цифровизации металлургических технологий. Результаты исследования также используются в учебном процессе НИТУ МИСИС.

Достоверность и обоснованность научных результатов

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается комплексным характером исследования и согласованным применением экспериментальных, металлографических и расчетных методов. Экспериментальная часть выполнена на опытно-промышленных станах РСП МИСиС-130Т, МИСиС-100Т и министане 14-40; температура контролировалась ИК-пирометрами с предварительной тарировкой, параметры привода регистрировались с использованием системы SCADA, а диапазон полиморфного превращения определялся дилатометрическим методом.

Значительный объем экспериментальных данных включает 59 режимов прокатки на трех типоразмерах оборудования и результаты металлографического анализа более 100 образцов. В расчетной части использован современный программный комплекс на основе конечно-элементного метода QForm 3D с учетом температурно-зависимых теплофизических и реологических свойств сплава ВТ3-1, а результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными по нескольким независимым критериям. Для ML-моделей проведено разделение данных на обучающую и тестовую выборки и дополнительная проверка на валидационных режимах с использованием нескольких общепринятых метрик качества.

Совокупность полученных результатов является внутренне согласованной: выявленные экспериментально тенденции изменения температурного поля и структуры объясняются расчетными данными о тепловом и деформационном состоянии металла, а сформулированные технологические рекомендации вытекают из результатов экспериментальных и численных исследований.

Рекомендации по дальнейшему использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать при разработке и совершенствовании технологий радиально-сдвиговой прокатки прутков из двухфазных титановых сплавов, особенно при производстве длинномерного мелкого и среднего сортамента, для которого критичным является управление температурным состоянием по длине и сечению прутка.

Разработанные цифровые и предиктивные инструменты могут быть рекомендованы для дальнейшей интеграции в системы автоматизированного управления технологическими процессами РСП, а также для предварительного расчета и оптимизации режимов прокатки при изменении размеров заготовки, конечного диаметра, температуры нагрева и скоростного режима.

Полученные экспериментальные данные, конечно-элементная модель и методика построения ML-моделей представляют интерес для предприятий металлургической промышленности, специализирующихся на производстве титанового сортового проката (АО «Чепецкий механический завод», Корпорация ВСМПО-АВИСМА, АО «Русполимет»), а также для научно-исследовательских организаций (ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) и университетов при проведении дальнейших исследований по цифровому сопровождению процессов обработки металлов давлением и при подготовке специалистов по направлениям «Металлургия», «Технологические машины и оборудование» и смежным дисциплинам.

Замечания и вопросы по работе

1. В литературном обзоре рассмотрены основные закономерности влияния температуры, коэффициента вытяжки, скорости прокатки и геометрических параметров заготовки на процесс РСП титановых сплавов. Вместе с тем сравнительный анализ опубликованных результатов применительно именно к сплаву ВТ3-1 представлен в ограниченном объеме. В частности, недостаточно подробно сопоставлены различные подходы к формированию глобулярной, бимодальной и пластинчатой микроструктуры при РСП и традиционных способах термодеформационной обработки.

2. Наиболее существенная часть ML-исследования посвящена формированию моделей на базе данных МКЭ, однако независимая валидационная выборка представлена двумя режимами. Расширение внешней экспериментальной валидации по диапазону диаметров, длин и температур позволило бы более полно оценить обобщающую способность разработанного предиктивного инструмента и надежность его применения за пределами обучающей выборки.

3. Верификация конечно-элементной модели выполнена по времени прокатки, геометрии и температуре поверхности, что является достаточным для решения

поставленных задач. Более подробное исследование чувствительности результатов к величине фактора трения, коэффициенту теплопередачи, параметрам сетки конечных элементов и другим граничным условиям повысило бы методологическую полноту представленного цифрового инструмента.

4. В работе энергосиловые параметры рассматриваются главным образом на уровне экспериментально зарегистрированной токовой нагрузки привода. Представляло бы интерес дополнить данный анализ расчетом фактического момента на рабочих валках, мощности и работы деформации с последующим сопоставлением этих характеристик с температурой и сопротивлением деформации сплава ВТ3-1. Это позволило бы более полно оценить технологические ограничения рекомендуемых режимов, особенно при снижении температуры деформации до области $\alpha+\beta$.

5. При исследовании микроструктуры основное внимание уделено качественной оценке типов микроструктур и балльности зерна. Вместе с тем не проведено систематическое количественное сопоставление размера β-зерен, толщины α-пластин, объемной доли α-фазы и других параметров структурного состояния, что позволило бы установить непосредственную количественную связь между параметрами термодеформационного процесса и формированием структуры.

Перечисленные замечания не носят принципиального характера, относятся главным образом к направлениям дальнейшего развития выполненного исследования и не снижают научной и практической ценности диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Махмуд Алхаж Али Абдуллы на тему «Комплексное исследование и совершенствование термо-деформационных режимов радиально-сдвиговой прокатки прутков из титановых сплавов на основе конечно-элементного моделирования» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи, имеющей существенное значение для развития технологий обработки металлов давлением, повышения управляемости процесса РСП и совершенствования технологий получения прутков из двухфазных титановых сплавов.

Полученные результаты характеризуются научной новизной, достоверностью и практической значимостью. Автором выполнен значительный объем экспериментальных и расчетных исследований и предложены технологические решения по управлению температурным состоянием прутка.

Основные результаты работы опубликованы в 3 печатных работах, рекомендованных Перечнем ВАК и индексируемых в базах Web of Science и/или Scopus, а также в 2 тезисах докладов в сборниках научных конференций; работа апробирована на профильных конференциях и конкурсах.

По своему содержанию, уровню выполненных исследований, научной новизне, теоретической и практической значимости диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением по пунктам 1, 3 и 8 и требованиям действующего Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС. Автор диссертации Махмуд Алхаж Али Абдулла заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

Диссертационная работа Махмуд Алхаж Али Абдуллы и отзыв на нее обсуждены на заседании кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Присутствовали 17 человек, из них 4 доктора технических наук, 8 кандидатов технических наук. Результаты голосования: «за» - 17, «против» - нет, «воздержались» - нет, протокол № 2 от «14» октября 2026 года.

Заведующий кафедрой «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доктор технических наук (научная специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением), профессор

15.10.2026 г. Платов Сергей Иосифович

Сведения об организации:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»
Адрес: Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Тел.: +7 (800) 100-1934
E-mail: mgtu@magtu.ru

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Начальник отдела делопроизводства
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Д.Г. Семенова