

На правах рукописи



**Ворошилов Денис Сергеевич**

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА  
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АІ-РЗМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ**

**2.6.4. Обработка металлов давлением**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Магнитогорск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный консультант:

**Сидельников Сергей Борисович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Колесников Александр Григорьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Оборудование и технологии прокатки», профессор

**Шварц Данил Леонидович**,  
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Обработка металлов давлением», заведующий кафедрой

**Уманский Александр Александрович**,  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», директор института металлургии и материаловедения

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Ведущая организация:

Защита состоится «17» марта 2026 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.324.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, проспект Ленина 38, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте: <https://www.magtu.ru/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, профессор

Мезин  
Игорь Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** До настоящего времени в области металлообработки для производства проволоки малого поперечного сечения из алюминиевых сплавов на всех этапах технологического процесса (получение слитков, прессование или прокатка, волочение, термообработка) преимущественно используется энерго- и металлоемкое формообразующее оборудование и многопереходные процессы деформации металла. Такие технологии используются для получения из этих сплавов проволоки электротехнического назначения, сварочной проволоки, проволоки для 3D печати и т.п. При применении традиционных технологий обработки требуются значительные энерго- и трудозатраты, связанные с необходимостью обработки крупных слитков (потери металла при переделах составляют до 25-30 %). Эти технологии также становятся неэффективными при небольших партиях изготовления продукции, что в последнее время является особенностью производства проволоки из алюминиевых сплавов системы Al-P3M (редкоземельные металлы), особенно для изготовления кабельно-проводниковой продукции ответственного назначения. Для отечественной промышленности, насыщенной металлургическими предприятиями, создание энергоэффективных ресурсосберегающих технологий совмещенной обработки для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов является важной задачей для ресурсосбережения и снижения энергоемкости. Так, например, непрерывностью, относительно высокой производительностью и мобильностью, а также гибкостью перехода от одного типоразмера к другому, отличаются технологии получения слитков малого поперечного сечения, изготавливаемые с помощью электромагнитного кристаллизатора и последующей их обработки на машинах непрерывного прессования типа Конформ и Экстроллинг. Интеграция процессов непрерывного литья с устройствами совмещенной прокатки-прессования (СПП) позволяет существенно повысить технико-экономические показатели и получать заготовки для волочения требуемых размеров. Немаловажно, что при этом свойства таких длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов характеризуются повышенными показателями прочности и пластичности, что дает возможность усовершенствовать процесс последующего волочения за счет ужесточения режимов обжатий и снижения количества отжигов. Практически такой же технико-экономический эффект дают технологии, совмещающие разливку, прокатку и прессование металла в одном технологическом агрегате. Эти технологии отличаются тем, что производительность и выход годного готового металла при их реализации значительно выше, чем при применении традиционных технологий обработки. Для реализации таких технологий могут применяться различные методы, например, получивший развитие в последнее время метод бесслитковой прокатки-прессования

(БПП). Внедрение новых технологий диктует потребность в углубленном и всестороннем исследовании процессов формоизменения, температурно-скоростных параметров и напряженно-деформированного состояния металла. Эти исследования осуществляются посредством теоретических изысканий и применения современных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов.

Еще одной научной проблемой является исследование технологических режимов волочения для получения проволоки малых диаметров из сплавов системы Al-P3M. Особенно это важно для авиастроения для получения кабельно-проводниковой продукции с заданным уровнем механических и эксплуатационных свойств.

Предметом исследования выступают технологические процессы и оборудование, применяемые при производстве проволоки на основе сплавов алюминия с редкоземельными металлами (Al-P3M).

На основании вышеизложенного, актуальным становится создание технических и технологических решений, подкрепленных научными исследованиями, направленных на использование совмещенных процессов и конструкций модульного оборудования для увеличения эффективности производства пресс-изделий из алюминия и его сплавов, что представляет собой важную научно-техническую задачу, которая нуждается в незамедлительном решении.

Данное утверждение подчеркивается тем, что работа выполнялась в рамках программ реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. №218 «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоеффективного оборудования для производства электротехнической катанки» (13.G25.31.0083) и «Разработка экономнолегированных высокопрочных Al-Sc сплавов для применения в автомобильном транспорте и судоходстве» (03.G25.31.0265); государственного задания на науку ФГАОУ ВО СФУ «Развитие физико-химических основ ресурсосберегающих технологий производства цветных, рассеянных и редкоземельных металлов, создание новых материалов на их основе» (FSRZ-2020-0013); госбюджетной НИР «Исследование реологических характеристик деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, полученных с применением новых методов литья, прокатки и прессования»; гранта РНФ «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов из низколегированных алюминиевых сплавов системы Al-P3M для производства кабельно-проводниковой продукции с использованием различных совмещенных методов обработки и исследование их реологических характеристик» (23-29-00028); гранта РФФИ: «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al-P3M с примене-

нием методов совмещенной обработки и исследование их реологических свойств» (18-48-242021).

**Степень разработанности темы.** Несмотря на проведенные учеными института цветных металлов ФГАОУ ВО «СФУ» комплексные изыскания в области комбинированных технологий обработки алюминиевых сплавов различных систем легирования, достижение целевых показателей физико-механических и эксплуатационных свойств полуфабрикатов небольшого поперечного сечения, получаемых из сплавов Al-P3M и Al-Mg-Sc, обуславливает необходимость дальнейших научных изысканий.

**Целью исследований является** разработка комплекса технических и технологических решений для создания энергоэффективных и материально-сберегающих технологий производства проволоки малых сечений из сплавов системы Al-P3M на базе применения совмещенных процессов обработки, обеспечивающих экономию энергоресурсов, повышение выхода годного металла и производительности.

**Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:**

1. Разработка новых технических решений для совмещенной обработки алюминиевых сплавов системы Al-P3M и выбор сплавов для исследований.
2. Разработка методологических и теоретических основ процесса совмещенной прокатки-прессования при использовании одного приводного вала и заготовки круглого поперечного сечения.
3. Создание комплекса компьютерных моделей, анализ и получение новых данных по технологическим параметрам совмещенных процессов прокатки, прессования и волочения при использовании заготовки круглого поперечного сечения и процесса БПП для двух исследуемых сплавов системы Al-P3M.
4. Проведение экспериментальных исследований для этих сплавов с оценкой параметров термодеформационной обработки с целью получения длинномерных литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов из исследуемых сплавов.
5. Оценка физико-механических свойств длинномерных полуфабрикатов из исследуемых сплавов на всех технологических переделах.
6. Разработка технологии и получение опытных партий проволоки электротехнического назначения диаметром 0,3-0,5 мм из сплавов системы Al-P3M с различным содержанием церия и лантана, а также опытных партий сварочной проволоки диаметром 3 мм из сплавов 01570 и 1580.
7. Практическое применение полученных результатов исследований для производства проволоки из исследуемых сплавов.

**Научная новизна полученных результатов исследований.**

1. В рамках развития научных основ совмещенной прокатки-прессования длинномерных деформируемых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов впервые разработана теоретическая база для исследований процессов де-

формации заготовки прямоугольного поперечного сечения при использовании одного приводного вала и заготовки круглого поперечного сечения при использовании двух приводных валков в закрытых ящичных калибрах, включающая методику определения реализуемости процесса СПП, оценку формоизменения металла, расчет температурно-скоростных и энергосиловых параметров с использованием предложенных формул и результатов компьютерного моделирования.

2. С применением вариационных методов разработана математическая модель процесса совмещенной прокатки-прессования в закрытых ящичных калибрах заготовки круглого поперечного сечения, с помощью которой впервые были получены новые научные знания комплекса геометрических, технологических и энергосиловых параметров этого процесса, что позволило реализовать его практическое использование для обработки исследуемых сплавов системы Al-P3M.

3. С помощью методов осадки и кручения получены новые данные и построены регрессионные модели реологических свойств для исследуемых сплавов, которые дали возможность выполнить компьютерное моделирование изучаемых процессов совмещенной обработки.

4. Путем конечно-элементного моделирования установлены закономерности формоизменения металла, распределения температуры, скоростей течения и энергосиловых параметров по длине очага деформации процесса СПП при использовании заготовки круглого поперечного сечения для процесса получения прутков из сплавов системы Al-P3M, отличающихся различным содержанием церия и лантана.

5. Получены новые научные данные и установлены закономерности изменения механических свойств пресс-изделий из сплавов алюминия системы Al-P3M, полученных методом СПП и последующим волочением с применением отжигов, что позволило достичь регламентированных техническими условиями комплекса механических и электрических свойств.

6. Получены новые научные данные и установлены закономерности изменения механических свойств пресс-изделий из сплавов алюминия системы Al-P3M, полученных методом БПП и последующим волочением, что позволило снизить трудоемкость при получении проволоки малых сечений из сплава 01417.

7. Получены новые научные данные и установлены закономерности изменения механических свойств пресс-изделий из сплавов алюминия системы Al-Mg с различным содержанием скандия, полученных методом БПП и последующим волочением с применением отжигов, что позволило достичь требуемого комплекса физико-механических свойств.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Создана методика реализации последовательности разработки процессов прокатки, прессования, волочения и термообработки длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, с применением которой прове-

дены всесторонние исследования технологии получения проволоки технического назначения из 4 сплавов системы Al-P3M.

2. Разработаны компьютерные модели изучаемых процессов обработки, которые в дальнейшем были использованы для анализа формоизменения, энергосиловых и температурно-скоростных параметров процессов совмещенной обработки сплавов алюминия с P3M.

3. Разработаны и исследованы режимы получения из заготовок круглого сечения после ЭМК из сплава 01417 диаметром 12 и 18 мм длинномерных деформированных полуфабрикатов методами СПП и волочения с промежуточными отжигами, которые позволили реализовать новую энергосберегающую технологию производства проволоки на установках совмещенной обработки.

4. С использованием результатов моделирования и экспериментальных исследований разработан комплекс ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из исследуемых сплавов системы Al-P3M с применением совмещенных методов обработки, что позволяет снизить энергоемкость на 30-50 % и увеличить выход годного металла на 18-20 % по сравнению с традиционной технологией прямого горячего прессования на гидравлических прессах.

5. Разработаны технологические, деформационные и температурно-скоростные режимы непрерывного прессования для установок СПП-400 и СПП-200 и проведены испытания в условиях ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск) с целью изготовления опытных партий деформированных полуфабрикатов малого диаметра из сплавов Al-P3M из непрерывнолитой заготовки после ЭМК круглого поперечного сечения методом СПП и из расплава методом БПП.

6. Получены опытно-промышленные партии проволоки малого поперечного сечения (диаметр 0,3 мм) из сплава 01417, которые прошли независимые испытания механических, электрических свойств и термостойкости, и установлено их соответствие ТУ 1-809-1038-2018.

7. Установлены рациональные деформационные режимы бесслитковой прокатки-прессования при получении заготовки под последующее волочение сварочной проволоки из сплавов системы Al-Mg с различным содержанием скандия (сплавы 1580 и 01570).

8. Предложена технологическая схема получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Mg с различным содержанием скандия, которая состоит из трех технологических процессов (БПП, сортовой прокатки и волочения и отжига), позволяющих получить сварочную проволоку диаметром 3 мм по ГОСТ 7871-2019 и качественные сварные швы при ее применении, что позволяет обеспечить прочность (временное сопротивление) на уровне 75-85% от прочности основного металла.

9. Создан ряд технических и технологических решений, защищенных патентами РФ №2457914, №2570684, № 2689460, №2724758, №2792327, №2847204), на основе которых спроектирован инструмент и изготовлена установка для совмещенной обработки алюминиевых сплавов, отличающиеся тем, что их применение позволяет снизить трудо- и энергоемкость, повысить производительность процесса непрерывной прокатки-прессования и качество получаемых профилей, а также позволяет получать деформированные полуфабрикаты из заготовок круглого поперечного сечения малопластичных металлов и сплавов с высоким уровнем механических свойств.

**Методология и методы исследований.** Исследования опирались на фундаментальные принципы обработки металлов давлением и экспериментальные методы определения параметров деформации. Свойства металла оценивались посредством испытаний на растяжение и кручение, а его микроструктура исследовалась металлографически. Процесс деформации моделировался методом конечных элементов в программе DEFORM-3D.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты численного моделирования и экспериментально-аналитической оценки параметров процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытом ящичном калибре для исследуемого сплава;
2. Результаты экспериментальных исследований реологических свойств непрерывнолитых заготовок, полученных с помощью ЭМК, и физико-механических свойств длинномерных литых и деформированных полуфабрикатов из сплава 01417;
3. Технические и технологические решения для получения проволоки диаметром 0,5 мм методом СПП из сплава 01417 с требуемым уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств;
4. Технические и технологические решения для получения проволоки диаметром 2,0 мм из сплава Al+1%РЗМ с применением методов СПП и БПП с требуемым уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств;
5. Технические и технологические решения для получения проволоки диаметром 3,0 мм из сплавов 01570 и 1580 с применением метода БПП с заданным уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств.

**Личный вклад соискателя** заключается в проведении комплекса исследований, нацеленных на:

1. Разработку методологических и теоретических основ процессов совмещенной прокатки-прессования и бесслитковой прокатки-прессования с целью создания ресурсосберегающих технологий термодеформационной обработки для получения проволоки из сплавов алюминия с РЗМ.

2. Разработку научных основ процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки прямоугольного поперечного сечения в закрытых ящичных калибрах при использовании одного приводного валка, позволяющего значительно снизить энергосиловые затраты на деформацию металла.
3. Построение математической модели, описывающей совмещенную прокатку-прессование круглых в сечении заготовок.
4. Разработка численных моделей методом конечных элементов для оценки тепловых и силовых характеристик процесса совмещенной прокатки-прессования для различных сплавов алюминия с РЗМ.
5. Получение новых технологий совмещенной термодеформационной обработки для получения прутков и проволоки из исследуемых сплавов алюминия с РЗМ.
6. Разработку новых технических решений по конструкциям и способам совмещенной обработки и их патентование.
7. Промышленную апробацию и внедрение разработанных технологий совмещенной обработки в производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов с требуемым комплексом механических и эксплуатационных свойств.

**Достоверность результатов** исследований обеспечивается использованием проверенных наукой методов теории обработки металлов давлением, математических и статистических моделей, а также результатами лабораторных и заводских испытаний, которые отражают реальные производственные условия.

**Реализация работы в промышленности.** Результаты исследований прошли промышленную апробацию и внедрены на ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск), ООО «Научно-производственный центр Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск), ООО «Альянс 2008» (г. Красноярск), а проволока прошла испытания на АО «Красмаш» (г. Красноярск), ООО СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель, Республика Беларусь).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на российских, международных конференциях и конгрессах, таких как XV International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering» (г. Ченстохова, Республика Польша, 2014 г.); «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2017, 2019 г.); «Magnitogorsk Rolling Practice» (г. Магнитогорск, 2019, 2023, 2024 г.); «Наука и технологии» (г. Миасс, 2023 г.), «Инновации и прорывные наукоемкие технологии в развитии промышленности и образования» (г. Рудный, Казахстан, 2024 г.).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 39 публикациях, в том числе 1 монографии, 10 статьях из перечня журналов,

рекомендуемых ВАК, 22 статьях в изданиях, входящих в международные базы Scopus и Web of Science, и 6 патентах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения. Содержит 275 страниц машинописного текста, 141 рисунок, 62 таблицы, библиографический список из 261 наименования и 8 приложений. Структура диссертационной работы представлена на рис. 1.

## **РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АІ-РЗМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ**

Цель: разработка комплекса технических и технологических решений для создания энергоэффективных и материалосберегающих технологий производства проволоки малых сечений из сплавов системы АІ-РЗМ на базе применения совмещенных процессов обработки, обеспечивающих экономию энергоресурсов, повышение выхода годного металла и производительности

Объект исследований - технологические процессы и оборудование для получения проволоки из сплавов системы АІ-РЗМ

Сплавы системы Al-Ce-La

Сплавы системы Al-Mg-Sc

Математическое и компьютерное моделирование процессов совмещенной обработки сплавов системы АІ-РЗМ

Математическая модель процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого поперечного сечения в закрытых ящичных калибрах

Компьютерное моделирование формоизменения, температурно-скоростных и энергосиловых параметров процесса СПП для исследуемых сплавов

Разработка регрессионных моделей реологических свойств исследуемых сплавов и моделирование процесса СПП с одним приводным валом

Разработка ресурсосберегающих технологий производства проволоки малых поперечных сечений на базе создания комплекса технологических и технических решений

Технология производства проволоки из сплава системы Al-Ce-La диаметром до 2 мм

Технология производства проволоки из сплава системы Al-Ce-La диаметром до 0,3 мм

Технология производства проволоки из сплавов системы Al-Mg-Sc диаметром до 3,0 мм

Технические решения по способу, конструкции устройств для совмещенной обработки и химическому составу нового сплава

ООО «Завод современных материалов»

АО  
«Красмаш»

ООО «НПЦ МГД»,  
ООО «Альянс 2008»,  
СОАО «Гомелькабель»

Патенты: №2457914, №2570684,  
№2689460, №2724758,  
№2792327, №2847204

Рисунок 1 – Структурная схема диссертационной работы

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описаны цель и задачи исследования, показаны актуальность и прикладное значение работы.

**В первой главе** было проведено исследование применения сплавов Al-Ce-La для производства электропроводки и сплавов Al-Mg-Sc в качестве сварочной проволоки. В работе выделены их основные преимущества и недостатки при обработке давлением. Представлены основные способы получения проволоки из сплавов системы Al-PЗМ. Выполнен литературный обзор, посвященный поиску технических решений и наиболее перспективным методам термодеформационной обработки, а также формоизменению алюминиевых полуфабрикатов, получаемых по технологиям с совмещением различных схем деформации в одном узле обработки. Задачи исследований сформулированы на основе рассмотренных вопросов и сделанных выводов.

**Во второй главе** Представлены результаты теоретических исследований и моделирования процессов совмещенной прокатки-прессования (СПП) с одним и двумя приводными валками (рис. 2). Исследования проводились для заготовок круглого сечения, полученных в электромагнитном кристаллизаторе.

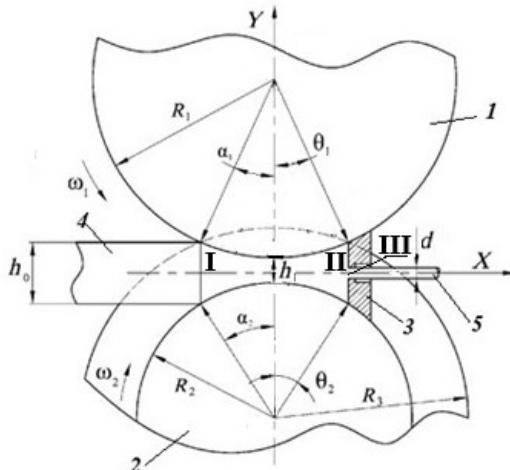


Рисунок 2 – Схема очага деформации процесса СПП с одним приводным валком: 1 – валок в выступом; 2 – валок с канавкой; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – пруток; I – зона прокатки; II – зона распрессовки; III – зона прессования

Приводным выступал валок 1 с наибольшей контактной поверхностью, выполненной с канавкой. Валок 2 с выступом являлся неприводным

и образовывал с валком 1 закрытый калибр, имеющий прямоугольное по-перечное сечение с минимальной высотой  $h_1$ . Заготовку квадратного сечения 4 высотой  $h_0$ , задавали в калибр, перекрытый на выходе из валков матрицей 3, которая имела калибрующее отверстие по форме и размерам прессуемого прутка 5 диаметром  $d$ .

Расчет параметров процесса СПП с одним приводным валком осуществлен с помощью программного комплекса Deform 3D, что позволило проанализировать, выполнить и установить закономерности их перемещения такие, например, как распределение моментов на приводном и неприводном валках, распределение скоростей течения металла, сил на валках и матрице и температур в очаге деформации. Для уточнения реологической модели при помощи механических испытаний были получены данные о свойствах сплава 01417. После анализа полученные данные были аппроксимированы и занесены в базу материалов системы Deform 3D. В качестве исходных параметров для моделирования процесса СПП для сплава 01417 приняты следующие: показатель трения по Зибелю на матрице  $\psi_m = 0,58$ , на валках  $\psi_b = 0,9$ ; размеры поперечного сечения литой заготовки  $14 \times 14$  мм; начальная температура литой заготовки  $T_3 = 550^\circ\text{C}$ ; диаметр валка с ручьем составлял 162 мм, а диаметр валка с выступом – 214 м; частота вращения валков равна 4 об/мин; степень обжатия при прокатке  $\varepsilon = 50\%$ . Начальная температура инструмента  $T_u$  (валков  $T_b$  и матрицы  $T_m$ ) была принята одинаковой и варьировалась в диапазоне от 80 до  $400^\circ\text{C}$ .

Результаты моделирования энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса СПП с одним приводным валком представлены на рис. 3. Со стороны валка с выступом, который не приведен в движение, образуется наплыв металла, что вызвано разностью скоростей течения металла в различных частях заготовки. Анализ полученных данных дал возможность установить температуру металла при различных условиях, что с увеличением температуры рабочего инструмента существенно снижается неравномерность распределения температуры заготовки в очаге деформации.

Реализуемость процесса оценивали по известной методике с помощью коэффициента  $K_y = \frac{P_1 - P_2 \lambda}{P_1} \cdot 100\%$ , где  $P_1$  – сила, подводимая валками,

$P_2$  – сила, затрачиваемая на деформацию металла и трение,  $\lambda$  – коэффициент, характеризующий отношение текущей скорости металла к скорости валков.

Обжатия в 30 % при прокатке не хватает для реализации процесса СПП с одним приводным валком. При обжатии 50 % расчеты показали, что процесс СПП с одним приводным валком будет протекать устойчиво только при значении коэффициента вытяжки  $\mu = 4,8$  и 8,0. При этом сила, подводимая валками, будет превышать силу для выдавливания прутка на величину от 40 до 80 % в зависимости от коэффициента вытяжки.

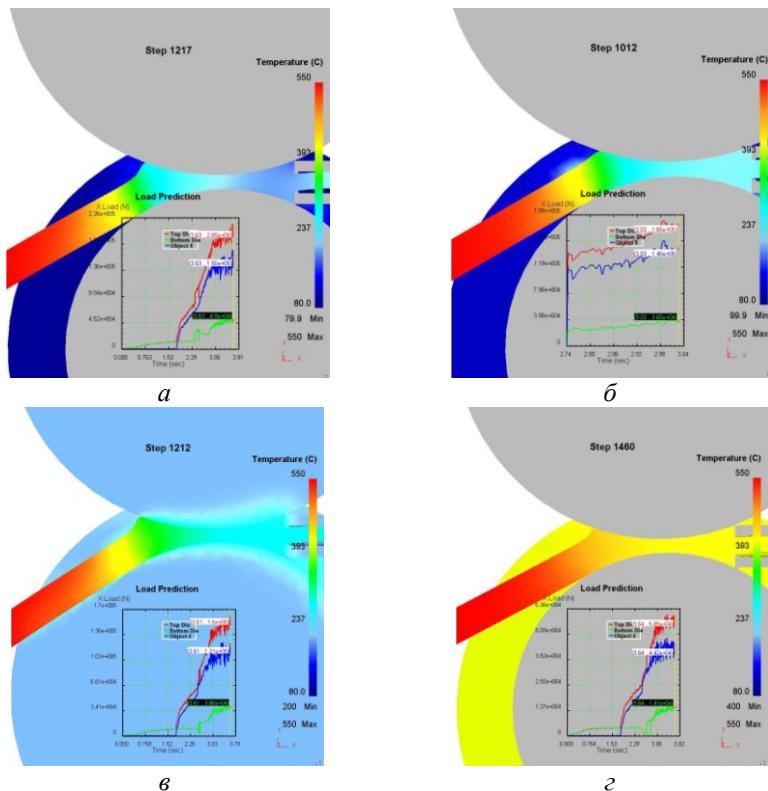


Рисунок 3 – Распределение температуры и значения силы, действующей на матрицу, при температуре заготовки ( $T_3$ ), равной  $550^\circ\text{C}$ , в зависимости от начальной температуры инструмента ( $T_u$ ): *а* –  $80^\circ\text{C}$ ; *б* –  $100^\circ\text{C}$ ; *в* –  $200^\circ\text{C}$ ; *г* –  $400^\circ\text{C}$

Если удалить матрицу от 15 до 35 мм и при коэффициенте вытяжки от 4,8 до 15,7, то он несущественно влияет на коэффициент реализуемости для двух приводных валков. В результате моделирования операции прокатки с обжатием 70 % обнаружено, что коэффициент реализуемости процесса возрос от 20 % до 35 % по сравнению с предыдущими расчётом, как для конфигурации с одним, так и с двумя приводными валками, но силовые параметры будут выше. Таким образом, коэффициент реализуемости  $K_y$  для процесса СПП с одним приводным валком в среднем на 20 % ниже по сравнению со схемой с двумя приводными валками.

Для расчета изменения температуры металла и инструмента при прокатке-прессовании экспериментального сплава применялась разработанная ранее программа, реализованная в среде Microsoft Excel. При этом

определяли объемные и поверхностные источники тепла и изменение температуры деформируемого металла и температуры валков на контакте при прохождении каждой зоны очага деформации без учета и с учетом охлаждения инструмента. Результаты расчетов температуры металла по длине очага деформации, определяемой отношением длины каждой зоны  $L_i$  к его общей протяженности  $L$ , для опытного сплава 01417 при различных скоростях деформации  $\xi$  и температурах заготовки и инструмента представлены на рис. 4.

На основании проведенных расчетов и моделирования процесса СПП с одним приводным валком для экспериментальных исследований в качестве параметров рекомендованы следующие значения:

- величина обжатия  $\varepsilon$  при прокатке должна составлять не менее 50 %;
- величина удаления матрицы от плоскости наименьшего сечения калибра должна находиться в диапазоне от 15 до 25 мм при коэффициенте асимметричности процесса  $x = R_1/R_2 = 1,27$ ;
- максимальный коэффициент вытяжки при прессовании - 10-15.

Проведенные исследования процесса СПП с указанными параметрами в лабораторных условиях на установке совмещенной обработки СПП-200 подтвердили сделанные выводы и позволили получить прутки из сплава 01417 при устойчивом протекании деформации металла.

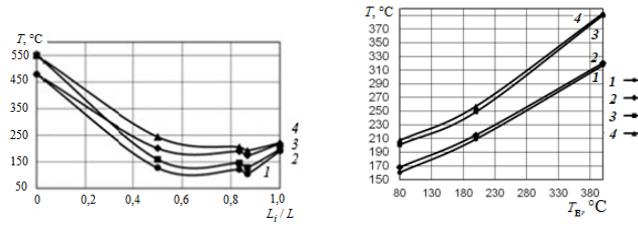


Рисунок 4 – Зависимость расчетной температуры металла от относительной длины очага деформации  $L_i/L$  (а) и зависимость расчетной температуры металла  $T$  от начальной температуры нагрева валков  $T_B$  (б) и при следующих параметрах: 1 –  $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ ,  $T_3 = 480^\circ\text{C}$ ; 2 –  $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ ,  $T_3 = 480^\circ\text{C}$ ; 3 –  $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ ,  $T_3 = 550^\circ\text{C}$ ; 4 –  $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ ,  $T_3 = 550^\circ\text{C}$

Для исследования геометрических параметров очага деформации и моделирования асимметричного процесса СПП с двумя приводными валками с использованием заготовки круглого сечения (рис. 5) создана методика и выполнены исследования реализуемости процесса СПП.

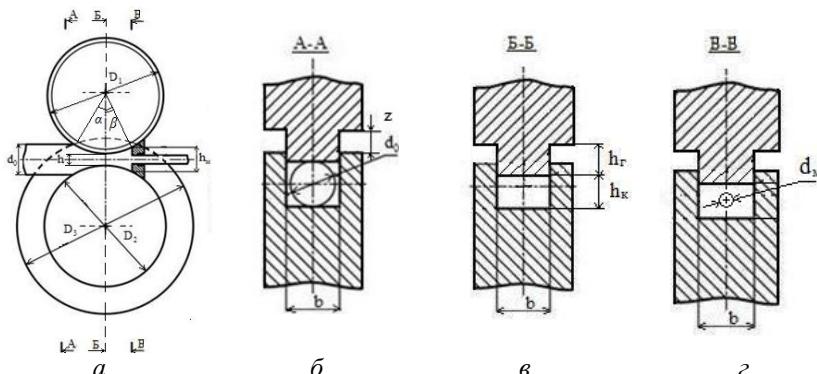


Рисунок 5 – Схема процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытом ящичном калибре: *а* – общий вид; *б* – на входе в деформирующий узел, *в* – при прокатке, *г* – при выдавливании пресс-изделия из матрицы

Формоизменение при обработке круглых заготовок в прямоугольных калибрах коренным образом отличается от деформации, происходящей при работе с типовой квадратной заготовкой.

Деформация круглых заготовок в прямоугольном калибре существенно отличается от деформации квадратных. Требуемое 50% обжатие для стабильного процесса СПП прямоугольных заготовок применимо только при полном заполнении калибра, что не выполняется для круглых. Ввиду нетехнологичности получения квадратных заготовок в электромагнитном кристаллизаторе, для круглых заготовок рекомендуется увеличение ширины канавки калибра на 5-15% от диаметра. Недостаточное обжатие приводит к снижению контактных сил, проскальзыванию и остановке процесса, что подтверждается анализом следов контактного взаимодействия.

Условие реализуемости в данном случае:

$$h_{\Gamma\Theta} \geq h_{\Gamma}; \quad (1)$$

$$h_{\Gamma} = z + \frac{0,25\pi d_0^2}{b}, \quad (2)$$

где  $h_{\Gamma\Theta}$  – экспериментальное значение высоты гребня валка, заложенное в конструкции установки совмещенной обработки;  $h_{\Gamma}$  – высота гребня валка с выступом;  $z$  – величина зазора между валками;  $b$  – ширина канавки валка с ручьем;  $d_0$  – диаметр исходной заготовки круглого сечения (см. рис. 5).

Расчет по приведенным формулам был выполнен для условий деформации на установке СПП-200 и СПП-400 (табл. 1). Высота гребня валка 6,5 мм полностью соответствует результатам эксперимента (6,5 мм).

Таблица 1 – Параметры процесса для обработки круглых заготовок на установках СПП

Параметры	СПП-400	СПП-200
Диаметр заготовки $d_0$ , мм	12; 18	12
Температура заготовки $T_3$ , °С	480; 550	480; 550
Частота вращения валков $n$ , об/мин	4; 8	4; 8
Степень деформации по высоте при прокатке $\varepsilon$ , %	50	50
Диаметр валка с выступом $D_1$ , мм	385	214
Диаметр валка с канавкой $D_2$ , мм	385	167
Высота гребня валка с выступом $h_{\text{ГЭ}}$ , мм	8	7
Величина зазора между валками $\delta$ , мм	2	2
Размеры калибра в наименьшем сечении $h \times b$ , мм	7×15; 10×21	3
Усилие гидроприжима, кН	400	20
Диаметр матрицы $d_m$ , мм	5; 9	2
Высота рабочего пояска матрицы $L_m$ , мм	3	50
Высота зеркала матрицы $h_m$ , мм	20; 26	12
Коэффициент вытяжки при прессовании $\mu$	6,5 - 27,2	5

Для решения задачи анализа формоизменения металла и энергосиловых параметров совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытых ящичных калибрах с использованием методики теоретического исследования профессора В.К. Смирнова была создана математическая модель этого процесса.

Математической основой анализа деформированного состояния и энергосиловых параметров процесса обработки служит система уравнений, включающая вариационное уравнение принципа минимума полной мощности

$$\delta(N_{\text{вн}} + N_{\text{ср}} - N_{\text{ск}} - N_{\text{вал}}) = 0 \quad (3)$$

и уравнение баланса мощности, записанное в виде

$$N_{\text{вн}} + N_{\text{ср}} - N_{\text{ск}} - N_{\text{вал}} = 0, \quad (4)$$

где  $N_{\text{вн}}$  – мощность внутренних сил;  $N_{\text{ср}}$  – мощность сил среза;  $N_{\text{ск}}$  – мощность напряжений трения на скоростях скольжения;  $N_{\text{вал}}$  – подводимая валками мощность.

Для разработки математических моделей был использован следующий подход: применялся вариационный принцип минимума полной мощности, составлялось уравнение баланса мощностей, а схема процесса (рис. 6) служила основой для описания системы.

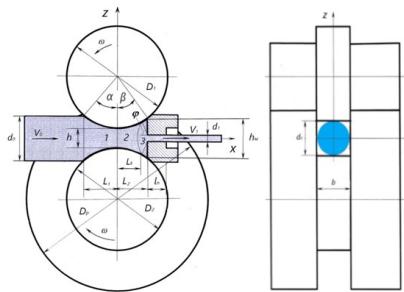


Рисунок 6 – Схема очага деформации процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытых ящичных калибрах

Форма и размеры очага деформации при СПП описываются безразмерными параметрами (табл. 2). Диапазон их значений определен на основе анализа геометрии очага деформации, полученной в экспериментах с валковым и прессовым инструментом экспериментальных установок СПП-200 и СПП-400 (см. табл. 1).

Математическая модель строится на основе трех ключевых компонентов: геометрического описания зоны пластической деформации с учетом ее изменяемых характеристик, кинематически допустимого поля скоростей и заданных граничных условий, а также составляющих полной мощности, входящие в эти уравнения.

Таблица 2 – Безразмерные параметры очага деформации

Параметр	Обозначение величины	Выражение	Значения безразмерных параметров
Приведенный диаметр валков	$A$	$A = \frac{D - d_0}{h}$	10; 30; 50
Приведенная ширина калибра	$\tilde{b}$	$\tilde{b} = \frac{b}{h}$	1,6; 2,0; 2,4
Приведенный диаметр заготовки	$\tilde{h}_0$	$\tilde{h}_0 = \frac{d_0}{h}$	1,1; 1,6; 2,1
Приведенная высота матрицы	$\tilde{h}_M$	$\tilde{h}_M = \frac{h_M}{h}$	1,1; 2,0; 2,9
Приведенный диаметр пресс-изделия	$\tilde{h}_1$	$\tilde{h}_1 = \frac{d_1}{h}$	0,4; 0,7; 1,0

Геометрическая модель процесса совмещенной прокатки-

прессования заготовки круглого сечения построена с учетом особенностей процесса, установленных при проведении экспериментальных исследований.

Для решения задачи приняты следующие допущения и граничные условия.

1. Катающие диаметры обоих валков  $D_1$  и  $D_2$  одинаковы и равны  $D$ .
2. Величина отстояния матрицы от общей оси валков  $L_2$  принята максимальной.
3. Изменение высоты поверхностей валков зависит от координаты  $x$  и подчиняется выражению

$$h_x = 0,5h + 0,5D - \sqrt{0,25D^2 - x^2}, \quad (5)$$

где  $x$  – текущая координата по соответствующей оси (см. рис. 7).

В области, где происходит переход от стадии распрессовки к стадии прессования, деформационный очаг определяется высотой калибра, обозначаемой как  $h_k$ , и следует соотношению

$$h_k = h + D - \sqrt{D^2 - 4k^2 \cdot L_2^2}, \quad (6)$$

где  $k = \frac{L_k}{L_2}$  – коэффициент, характеризующий положение переходного сечения относительно матрицы.

4. Если площади в переходном сечении равны, то геометрическая модель будет монотонной при  $x = L_k$ .
5. Скорость входа металла в валки записывали выражением

$$V_0 = \nu V_e \quad (7)$$

где  $\nu$  – скоростной коэффициент;  $V_e$  – скорость вращения валков

6. Параметры калибра обеспечивают полное его заполнение, поэтому уширение металла при прокатке не учитывается.
7. Предполагается, что на границе раздела между деформируемым металлом и рабочим инструментом (валками) отсутствует адгезия и имеет место только скольжение. Среднее напряжение трения на этой поверхности определяется выражением

$$\tau_{mp} = \psi \tau_s = \psi \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (8)$$

где  $\psi$  – показатель трения по Зибелю, зависящий от температуры металла, соотношения размеров очага деформации и состояния трущихся поверхностей,  $\tau_s$  – предел текучести металла на сдвиг.

Решение задачи в программном пакете MathCAD с использованием метода градиентного спуска и разработанного алгоритма для поиска варьируемых параметров  $k$  и  $\nu$  позволило собрать данные для множества комбинаций безразмерных параметров, которые визуализированы на рис. 7-9.

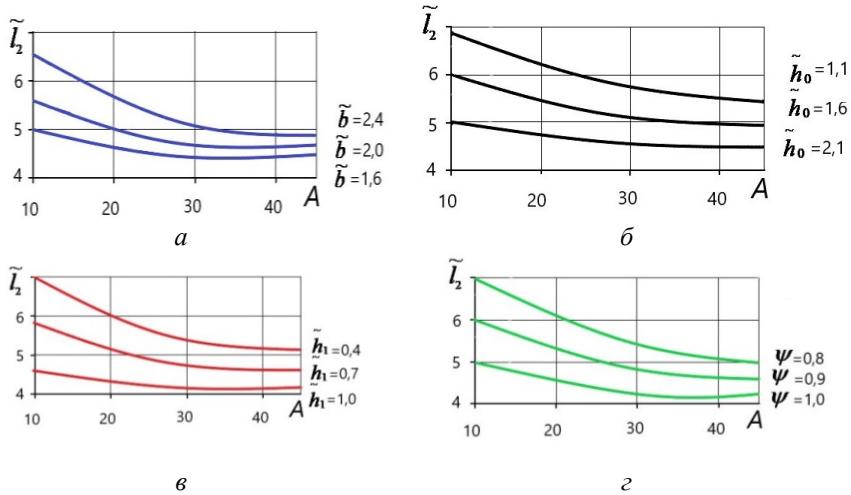


Рисунок 7 – Графики зависимостей величины отстояния зеркала матрицы от общей оси валков матрицы от безразмерных параметров очага деформации

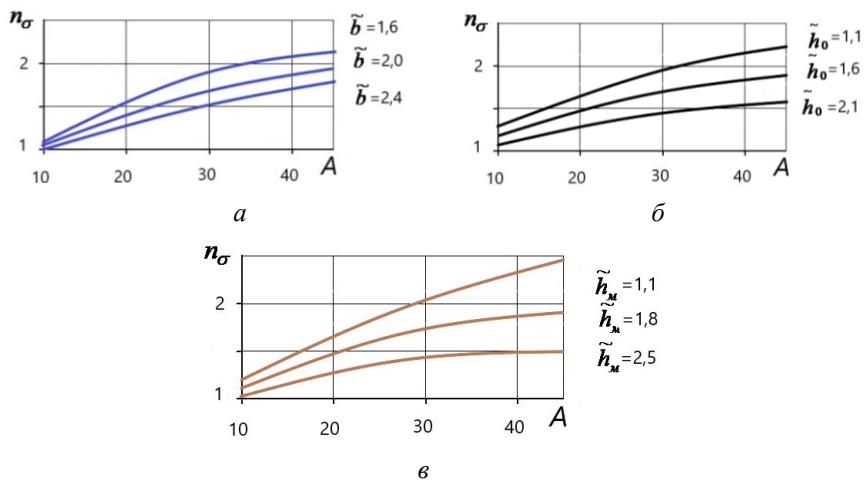


Рисунок 8 – Графики зависимостей коэффициента напряженного состояния от безразмерных параметров очага деформации

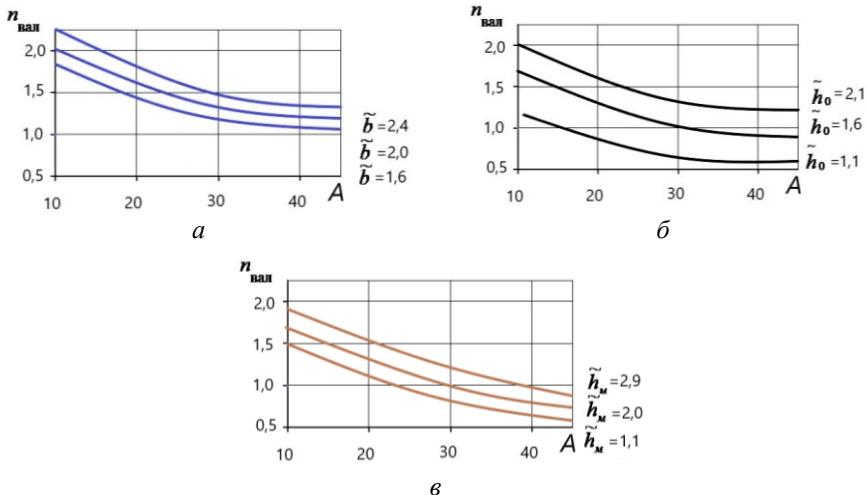


Рисунок 9 – Графики зависимостей коэффициента мощности от безразмерных параметров очага деформации

На основании проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

- величина отстояния зеркала матрицы от общей оси валков должна быть максимальной, но не превышающей расстояние от общей оси валков до точки раскрытия калибра;
- показатели контактного трения должны быть максимальными, для чего необходимо создавать условия предельного трения на контакте металла с валками;
- диаметр валков при одинаковых размерах калибра следует выбирать по возможности большими (400 мм и более), так как это приводит к росту коэффициента запаса;
- уменьшение размеров калибра ведет к снижению коэффициента запаса мощности  $K_N$  до минимальных значений;
- обжатие при прокатке должно быть близким к 50%;
- коэффициент вытяжки при выдавливании, в случае возможности его варьирования, для данных условий СПП следует выбирать в диапазоне  $\mu \geq 10$ .

На основании полученных данных можно заключить следующее:

- с увеличением приведенного диаметра валков  $A$  величина  $\tilde{l}_2$  уменьшается во всем диапазоне изменения безразмерных параметров, при этом за счет увеличения контакта металла с валками и активных сил трения интенсивно растет подводимая валками мощность, необходимая для экструдирования металла;

- увеличение приведенной ширины калибра  $\tilde{b}$  ведет к росту величины  $\tilde{l}_2$ , так как при этом значительно повышается объем деформируемого металла и, соответственно, затраты мощности внутренних сил;
- рост приведенного диаметра заготовки  $\tilde{h}_0$  при средних значениях безразмерных параметров процесса ведет к снижению величины  $\tilde{l}_2$  за счет увеличения обжатия при прокатке и подведенной валками мощности;
- увеличение приведенного диаметра пресс-изделия  $\tilde{h}_1$ , приводит к необходимости снижения  $\tilde{l}_2$ , так как вытяжка при прессовании при этом снижается;
- влияние показателя трения на контакте металла с инструментом соответствует общепринятым представлениям, то есть чем  $\psi$  больше, тем больше активные силы трения и величина  $\tilde{l}_2$  становится меньше;
- Коэффициент напряженного состояния  $n_\sigma$  сильно зависит от приведенных диаметров валков и заготовки, высоты матрицы и приведенной ширины калибра (увеличение приведенного диаметра повышает этот коэффициент и, как следствие, силу прокатки, а рост остальных безразмерных параметров снижает коэффициент и силу прокатки);
- Коэффициент мощности на валу ( $n_{\text{вал}}$ ) зависит от геометрических параметров процесса прокатки (увеличение приведенного катающегося диаметра валков приводит к снижению  $n_{\text{вал}}$ , в то время как рост приведенной ширины калибра, приведенного диаметра заготовки и приведенного диаметра пресс-изделия способствует увеличению  $n_{\text{вал}}$ , а значит, изменение этих параметров влияет на крутящий момент прокатки).

Такой характер зависимостей соответствует полученным ранее данным. В качестве рекомендаций по результатам математического моделирования можно выделить следующие:

- безразмерные параметры, характеризующие размеры заготовки и калибра следует выбирать таким образом, чтобы их значения приводили к росту обжатия при прокатке (не менее 50%), это единственное условие, при котором можно добиться уменьшения расстояния от зеркала матрицы до оси валков;
- вытяжку при прессовании необходимо, по возможности, минимизировать, так как ее рост, а значит увеличение приведенного диаметра пресс-изделия, может привести к остановке процесса прокатки-прессования из-за увеличения необходимой мощности для продавливания металла через калибрующее отверстие матрицы;
- если валки имеют небольшой диаметр, необходимо максимально отодвинуть матрицу от центральной линии, проходящей через оси валков;

- следует учитывать влияние приведенного диаметра валков на энергосиловые параметры процесса, так как его увеличение ведет к уменьшению коэффициента мощности и росту коэффициента напряженного состояния, что может привести к превышению значений этих параметров над допустимыми величинами силы и момента прокатки;
- при выборе параметров при прокатке-прессовании необходимо обеспечить на контакте металла с валками условия максимального трения, так как при этом достигаются необходимые силы активного трения, позволяющие гарантированно осуществить деформацию металла без остановки процесса и обеспечить минимальные энергозатраты на ее реализацию.

Для определения реализуемости процесса записывали уравнение баланса мощностей (2) в виде

$$N_p = N_{def} + N_{mp_M} + N_{mp_N}, \quad (9)$$

где  $N_{def}$  - мощность, затрачиваемая на деформацию металла без учета контактного трения;  $N_{mp_M}$  - мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на границе упругой и пластической зон перед матрицей;  $N_{mp_N}$  - мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на калибрующем пояске матрицы.

Коэффициент запаса мощности  $K_N$  рассчитывается по формуле

$$K_N = \frac{N_a}{N_p K_3}, \quad (10)$$

где  $K_3 = 1,1$  – коэффициент, учитывающий, что при выдавливании части металла в зазор между валками и матрицей расходуется дополнительная энергия, которая по экспериментальным оценкам составляет до 10 % от затраченной.

Расчет проведен для условий реализации процесса СПП по получению прутков диаметром 9 мм из сплава 01417 на установках СПП-200 и СПП-400 (см. табл. 1). С использованием результатов решения моделировали различные варианты реализации процесса СПП, варьируя технологическими и геометрическими параметрами при температуре заготовки 550 °C (рис. 10).

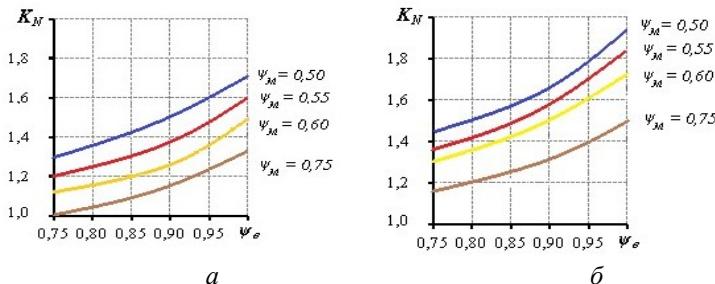


Рисунок 10 – Изменение коэффициента запаса мощности  $K_N$  в зависимости от различных условий контактного трения металла с валками и матрицей при обработке круглых слитков из сплава 01417 методом СПП: *а* – начальный диаметр валков  $D = 180$  мм; размеры калибра  $7 \times 15$  мм, *б* – начальный диаметр валков  $D = 400$  мм; размеры калибра  $10 \times 21$  мм

Анализ полученных данных, приведенных на рис. 10, показывает, что увеличение диаметра валков (рис. 10 *а*, *б*) приводит к росту коэффициента запаса мощности до 1,9 вследствие роста активных сил трения за счет увеличения площади контакта металла с валками. В этом случае уменьшение размеров калибра ведет к снижению коэффициента запаса мощности  $K_N$  до минимальных значений (рис. 10 *а*), что при пониженных значениях трения на контакте металла с валками может привести к остановке процесса.

Высокий показатель трения ( $\psi_e \geq 0,9$ ) обеспечивает устойчивость. Это необходимо для интенсификации адгезионного взаимодействия между материалами, что способствует более эффективному переносу деформации. В противоположность этому, при прессовании необходимо минимизировать фрикционные силы, чтобы снизить энергозатраты и предотвратить повреждение инструмента и заготовки. Минимизация трения при прессовании достигается применением смазочных материалов, оптимизацией геометрии инструмента и контролем скорости деформации. Создание условий, близких к интенсивному прилипанию при СПП, напротив, обеспечивается путем активации поверхности, повышения температуры и выбора материалов с высокой совместимостью. Таким образом, регулирование трения является ключевым фактором для достижения оптимальных результатов.

**В третьей главе** Проанализированы результаты экспериментальных испытаний и компьютерного моделирования, полученные при изучении совмещенной обработки для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки диаметром до 0,5 мм из сплавов системы Al-P3M.

Исследования проводили для алюминиевого сплава 01417, содержащего согласно ТУ 1-809-1038-2018 в своем составе 7-9% РЗМ (церий, лантан, празеодим), а также 0,22 масс. % железа и 0,1 масс. % кремния.

Данные по реологическим свойствам исследуемых сплавов (рис. 11) были получены методом кручения в лаборатории кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов Сибирского федерального университета на установке СПП-200. Результаты испытаний вносили в базу данных комплекса DEFORM 3D. Сбор данных о свойствах сплавов в широком диапазоне позволил создать условия для последующего компьютерного моделирования и анализа.

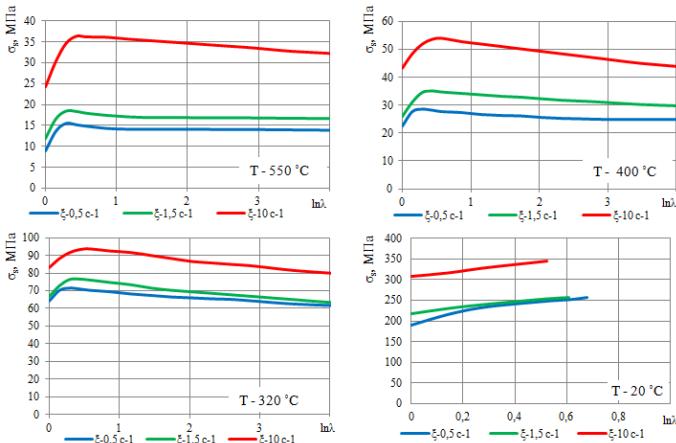


Рисунок 11 – Зависимость сопротивления деформации  $\sigma_s$  сплава 01417 от логарифмической вытяжки ( $\ln\lambda$ ) при различной температуре  $T$  и скорости деформации  $\xi$

В качестве параметров для моделирования процесса совмещенной прокатки прессования прутков из заготовки круглого поперечного сечения приняты следующие: температура заготовки  $550$   $^{\circ}\text{C}$ ; температура инструмента  $200$   $^{\circ}\text{C}$ ; степень деформации при прокатке  $\varepsilon = 50\%$ ; диаметр заготовки  $12$   $\text{мм}$ ; диаметр калибрующего отверстия матрицы  $5$   $\text{мм}$ ; длина рабочего пояска матрицы  $3$   $\text{мм}$ ; частота вращения валков  $\omega = 4$  и  $8$   $\text{об}/\text{мин}$ .

Моделирование процесса проводилось со следующими условиями и допущениями:

- материал заготовки изотропный;
- материал валков и матрицы жесткопластический;
- показатель трения по Зибелю при перемещении металла по зеркалу матрицы  $\psi_m = 0,3$ ;
- показатель трения по Зибелю на валках и калибрующем пояске матрицы  $\psi_b = 0,9$ ;

- валки не оснащены системой охлаждения;
- заготовка разделена на 20 тысяч конечных элементов.

Результаты моделирования формоизменения металла и распределения температуры при разной частоте вращения валков представлены на рис. 12, 13.

В качестве параметров для моделирования процесса совмещенной прокатки прессования прутков из заготовки круглого поперечного сечения приняты следующие. Диаметр заготовки составляет 12 мм. Частота вращения валков равна 4 и 8 об/мин. Температура заготовки достигает 550 °C, в то время как температура инструмента составляет 200 °C. Степень деформации при прокатке составляет 50 %. Диаметр калибрующего отверстия матрицы равен 5 мм, а длина рабочего пояска матрицы – 3 мм.

Моделирование процесса проводилось со следующими условиями и допущениями: Количество конечных элементов, на которые разбита заготовка, составляет 20 000 штук. Показатель трения по Зибелю для валков и калибрующего пояска матрицы равен  $\psi_b = 0,9$ . Материал валков и матрицы относится к жесткопластическим. Охлаждение валков не предусмотрено. Заготовка выполнена из изотропного материала, а показатель трения по Зибелю при перемещении металла по зеркалу матрицы составляет  $\psi_m = 0,3$ .

Результаты моделирования формоизменения металла и распределения температуры при разной частоте вращения валков представлены на рис. 12, 13.

Деформация круглой заготовки в процессе прокатки характеризуется отличиями по сравнению с заготовками квадратного сечения (см. рис. 12). На первом шаге, отображенном на рис. 12, а, заготовка захватывается валками, при этом контакт не является полным. Далее происходит обжатие: нижняя часть обрабатывается канавкой на валке, а верхняя – выступом. Дойдя до матрицы, заготовка прессуется, заполняя калибр (рис. 12, б), и затем экструдируется, принимая форму прутка (рис. 12, в).

Коэффициент обжатия по высоте, используемый в данном технологическом процессе, достигает 44%. Важно учитывать, что проскальзывание валков и охлаждение заготовки в зоне деформации могут замедлить процесс. Это происходит из-за уменьшения площади контакта между заготовкой и валками в угловых частях калибра (см. рис. 12, г), что снижает требуемое усилие для обработки и может привести к остановке, что снижает эффективность передачи деформирующего усилия. Процесс необходимо контролировать для предотвращения нежелательных остановок.

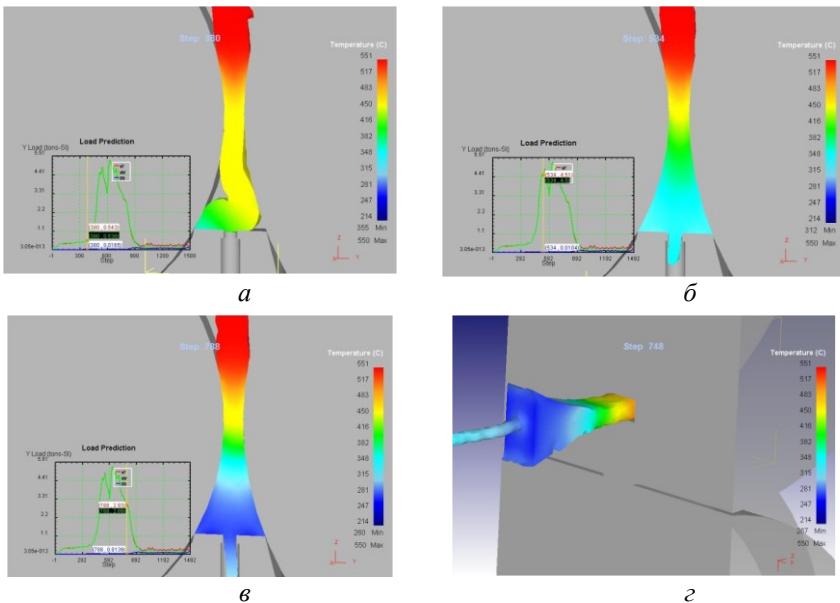


Рисунок 12 – Формоизменение металла и распределение температуры при обработке заготовки из сплава 01417 при частоте вращения валков  $\omega = 4$  об/мин: *a* – стадия прокатки; *б* – стадия распрессовки; *в* – стадия прессования; *г* – на установившейся стадии деформации металла

На начальном этапе технологического процесса происходит снижение температуры заготовки с 550 до 450 °C. Во время прессования температура сначала опускается до 330-340 °C, затем падает до 240-280 °C. В плоскости минимального сечения калибра средняя температура заготовки составляет 500 °C (рис. 13 а, б), в то время как в зоне прессования, на этапе выдавливания, температура колеблется в диапазоне 410-445 °C (рис. 13, в). Затем идет устойчивый режим и температура прутка будет 375 °C (рис. 13, г). Выполненные ранее расчёты показали, что при одинаковых габаритах калибра и одинаковой вытяжке в процессе прессования усилие при эксплуатации установки СПП-400 превышает соответствующее значение у установки СПП-200. Такое различие обусловлено большим диаметром валков, что приводит к более длительному контакту валков с обрабатываемым материалом. В связи с этим рекомендуется применять температуру заготовки  $T_3=550$  °C.

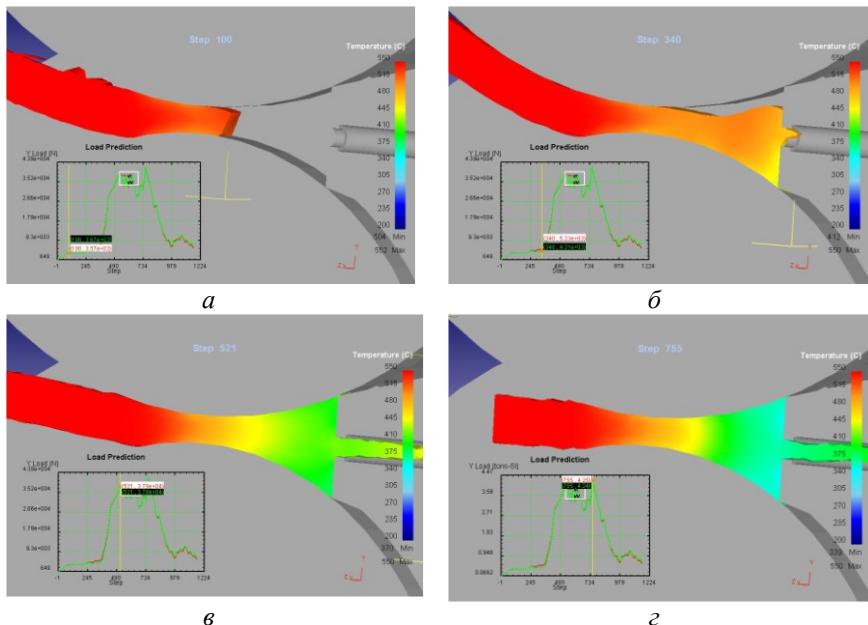


Рисунок 13 – Формоизменение металла и распределение температуры при обработке заготовки из сплава 01417 при частоте вращения валков  $\omega = 8$  об/мин: *а* – стадия прокатки; *б* – стадия распрессовки; *в* – стадия прессования; *г* – на установившейся стадии деформации металла

Расчетные и экспериментальные значения этих параметров приведены в табл. 3, где  $\Delta$  – погрешность расчетных данных.

С использованием данных по реологическим свойствам и результатов компьютерного моделирования были спланированы и проведены экспериментальные исследования предлагаемой технологии получения длинномерных полуфабрикатов из сплава 01417.

Методика проведения экспериментальных исследований включала следующие технологические переделы:

- литье сплавов в электромагнитный кристаллизатор и получение заготовок диаметром 12 мм;
- совмещенная прокатка-прессование прутков диаметром 5 мм из полученной заготовки;
- сортовая прокатка и волочение, либо только волочение проволоки до диаметра 0,5 мм;
- отжиг проволоки диаметром 0,5 мм по 4 режимам: 350, 400, 450, 500 °C при выдержке 1 ч (режим ТО 1, 2, 3 и 4 соответственно).

Таблица 3 – Расчетные и экспериментальные значения геометрических и энергосиловых параметров процесса СПП для сплава 01417

Значения параметров											
расчетные						экспериментальные					
$\tilde{l}_2$	$n_\sigma$	$n_{\text{вал}}$	$L_2$ , мм	$P_{\text{пр.}}$ , кН	$M_{\text{вал.}}$ , кН м	$L_2$ , мм	$\Delta$ , %	$P_{\text{пр.}}$ , кН	$\Delta$ , %	$M_{\text{вал.}}$ , кН м	$\Delta$ , %
СПП-200											
4,7	1,5	1,3	32,9	317	7,5	35,0	6,0	350	9,4	7,0	7,1
СПП-400											
4,9	1,7	1,0	49,0	764	33,5	54,0	9,2	740	3,2	30,6	9,5

Для замера силовых показателей применяли тензометрическую аппаратуру. Определение механических свойств проводили на универсальных испытательных машинах Walter+Bai AG LFM 400 kN для литьих заготовок и прессованных прутков, и LFM 20 kN усилием 20 кН (для проволоки). Электросопротивление определяли с помощью прибора «Виток».

Физико-механические свойства проволоки, полученной с использованием установки совмещенной обработки СПП-400, приведены в табл. 4. Допустимый интервал изменения прочностных свойств составил  $\pm 3$  МПа.

Таблица 4 – Физико-механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417

Состояние и режимы отжига	Механические свойства		Удельное электросопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$
	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	
Нагартованное	259	1,4	0,03151
	258	1,1	0,03158
Отожженное, $T=400^\circ\text{C}$ , $\tau = 4$ часа	161	14,5	0,03135
	157	14,3	0,03138
Отожженное, $T=450^\circ\text{C}$ , $\tau = 4$ часа	158	15,7	0,03139
	160	15,3	0,03144
Отожженное, $T=500^\circ\text{C}$ , $\tau = 4$ часа	159	16,7	0,03140
	155	17,0	0,03133

Таким образом, для реализации новой технологии термодеформационной обработки целесообразно использовать полученную в ЭМК непрерывнолитую заготовку диаметром 12 мм, имеющую однородную по сечению и длине структуру и высокую пластичность из-за минимального дендритного параметра, который сопоставим с размером дендритных ячеек в гранулах, т.е. 6-12 мкм.

Технологическая схема ЭМК+СПП с последующей сортовой прокаткой и волочением или только волочением позволяет получить требуемый уровень механических свойств, а также значения электросопротивления по ТУ 1-809-1038-2018.

Максимальной пластичностью, необходимой для дальнейшего получения проволоки диаметром до 0,1 мм, и минимальным значением

удельного электрического сопротивления, характеризуется проволока диаметром 0,5 мм, полученная методом ЭМК+СПП с последующей сортовой прокаткой и волочением, отожженная при температуре 500 °C и времени выдержки 1 ч.

**В четвертой главе** представлены данные, полученные в ходе моделирования и реальных экспериментов, которые описывают процесс совмещенной обработки для изготовления длинных заготовок (прутков и проволоки диаметром до 2 мм) из алюминиевого сплава с содержанием редкоземельных элементов до 1 %.

Моделирование инструментальной оснастки для процесса совмещенной прокатки-прессования металла в пакете SolidWorks, а моделирование процесса в программном комплексе DEFORM 3D. В качестве параметров для моделирования процесса совмещенной прокатки прессования прутков из заготовки круглого поперечного сечения приняты следующие:

- температура заготовки 480 и 550 °C;
- температура инструмента 100 °C;
- степень деформации при прокатке  $\varepsilon = 50 \%$ ;
- диаметр заготовки 12 мм;
- диаметр калибрующего отверстия матрицы 5 мм;
- длина рабочего пояска матрицы 3 мм;
- частота вращения валков  $\omega = 4$  и 8 об/мин.

Моделирование процесса проводилось со следующими условиями и допущениями:

- материал заготовки пластичный;
- материал валков и матрицы жесткопластический;
- показатель трения по Зибелю при перемещении металла по зеркалу матрицы равен  $\psi_m = 0,3$ ;
- показатель трения по Зибелю на валках и калибрующем пояске матрицы равен  $\psi_b = 0,9$ ;
- охлаждение валков не предусмотрено;
- количество конечных элементов в заготовке 20 тыс. шт.

В результате моделирования получено распределение температур и напряжений вдоль очага деформации при различных деформационных и скоростных параметрах процесса СПП (рис. 14).

При реализации процесса СПП при скорости вращения валков 8 об/мин, также как и в предыдущем случае, по мере заполнения очага деформации металлом наблюдается рост сил, действующих на валки и матрицу. В результате выделения деформационного тепла в зоне прессования происходит разогрев металла в зоне перед матрицей, и сила на валках снижается до 150 кН, а процесс приобретает стабильный характер.

На основе полученных результатов компьютерного и математического моделирования определены параметры инструмента и режимы обра-

ботки исследуемого сплава на установке СПП-200 для проведения экспериментальных исследований.

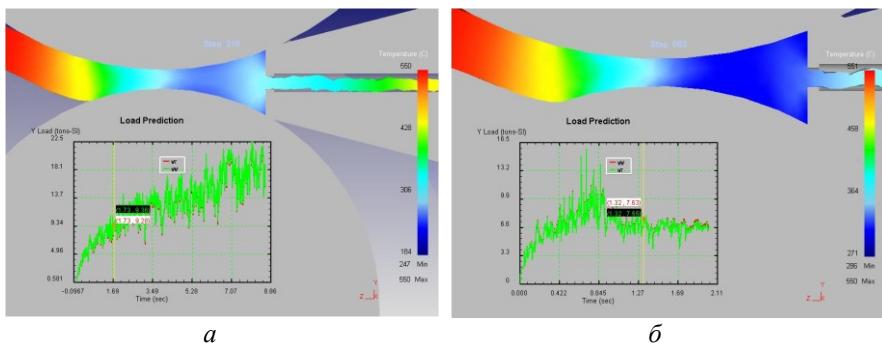


Рисунок 14 – Изменение температуры и графики силы, действующей на валки при обработке заготовки из сплава Al-1 %Р3М при температуре заготовки 550 °С и частоте вращения валков  $\omega = 4$  об/мин (а) и  $\omega = 8$  об/мин (б)

Маршрут волочения для прутков диаметра 9 мм составлял: 9,0–8,5–7,0–6,5–5,9–5,4–5,0–4,5–4,0–3,6–3,0–2,8–2,48–2,2–2,0 мм. Маршрут волочения для прутков диаметра 5 мм составлял: 5,0–4,5–4,2–4,0–3,6–3,3–3,0–2,8–2,48–2,2–2,0 мм. В табл. 7 приведены данные по механическим свойствам и электросопротивлению проволоки диаметром 2 мм в нагартованном и отожженном состояниях.

Следует отметить, что литые заготовки, полученные в электромагнитном кристаллизаторе, обладали достаточно высокой пластичностью, что дало возможность получить из них проволоку диаметром 2 мм без промежуточных отжигов.

Установлено также, что значения электросопротивления для проволоки диаметром 2 мм после холодной деформации выше, чем у прутков, полученных горячей деформацией. Для соответствия стандартам необходимо исследовать и установить параметры окончательного отжига.

С этой целью проведены исследования параметров термообработки полученных прутков и проволоки при различных режимах обработки и отжига: температура отжига 230 °С, время выдержки 1 час; температура отжига 300 °С, 1 ч; температура отжига 400 °С, 1 ч; температура отжига 450 °С, 10 ч.

Таким образом, результаты исследований показали, что для выполнения требований стандарта IEC 62004-07 для режима АТ1 рекомендуется применение режима отжига при температуре 230 °С и выдержке 1 час.

Таблица 7 – Значения механических свойств и электросопротивления проволоки из сплава Al-1 % РЗМ диаметром 2 мм, полученной из прутков диаметром 9 и 5 мм совмещенными методами обработки, при различных режимах отжига

Вид обработки	Состояние	Режим	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
<b>Проволока диаметром 2 мм из прутка диаметром 9 мм</b>					
ЭМК+СПП	Нагартованное	–	191	3,0	0,02990
	Отожженное	230 °C, 1 ч	163	9,5	0,02784
	Отожженное	300 °C, 1 ч	108	15,0	0,02786
	Отожженное	400 °C, 1 ч	87	28,3	0,02757
	Отожженное	450 °C, 10 ч	84	29,5	0,02753
<b>Проволока диаметром 2 мм из прутка диаметром 5 мм</b>					
ЭМК+СПП	Нагартованное	–	198	3,0	0,03000
	Отожженное	230 °C, 1 ч	155	3,5	0,02775
	Отожженное	300 °C, 1 ч	97	24,5	0,02750
	Отожженное	400 °C, 1 ч	93	31,0	0,02745
	Отожженное	450 °C, 10 ч	89	38,0	0,02705

Промышленное внедрение разработанной технологии было осуществлено на базе ООО «Завод современных материалов» в г. Красноярске. Там, с использованием установки СПП-400, были произведены опытные партии горячепрессованных прутков диаметром 9 мм из исследуемого сплава. Затем, в лабораторных условиях кафедры ОМД ИЦМ СФУ, из полученных прутков была изготовлена опытная партия проволоки электротехнического назначения диаметром 2,0 мм.

**В пятой главе** приведены результаты экспериментальных исследований процесса бесслитковой прокатки-прессования для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки диаметром до 0,3 мм из сплава с повышенным содержанием редкоземельных элементов (церия и лантанта) до 7 % (сплав 01417) и до 1%.

Для реализации процесса БПП использовали нагрев металла, помещенного в тигель в печи. Эксперименты осуществляли на установке, смонтированной на базе прокатного стана ДУО 200, включающей электродвигатель переменного тока, мощностью 40 кВт со скоростью вращения 900 об/мин, коробку передач, двухступенчатый редуктор с передаточным числом  $i = 40$  и максимальным моментом на выходном валу 10 кН·м, шестеренную и прокатную клети, последняя для удобства загрузки заготовки в калибр была повернута на угол 90° и установлена на опору. Коробка передач и двухступенчатый редуктор обеспечивали скорости вращения валков от 4 до 14 об/мин.

Реализация технологии получения проволоки включала следующие технологические переделы.

1. Приготовление расплава заданного химического состава.

2. Бесслитковая прокатка-прессование, для чего расплав задавали в калибр нагретых до  $T = 100$  °С валков и выдавливали в виде прутков различного диаметра, при этом визуально оценивали качество поверхности и отбирали образцы для исследования микроструктуры прутка, а также механических свойств металла.
3. Холодная сортовая прокатка и получение заготовки диаметром 1 мм.
4. Волочение прессованной заготовки на заданный размер 0,3 мм с отбором образцов для механических испытаний и проведения металлографических исследований.

Механические свойства полуфабрикатов по технологическим переделам приведены в табл. 8. Исследования термостойкости показали, что при температуре 250 °С временное сопротивление полуфабрикатов составляет 160 МПа, а при температуре 20 °С – 170 МПа. Таким образом установлено, что при температуре 250 °С прочность падает всего на 6 %, а значит термостойкость полученных изделий достаточно высока.

Таблица 8 – Результаты механических испытаний полуфабрикатов сплава системы Al-P3M

Полуфабрикат	Диаметр/ размер образца, мм	Механические свойства	
		Относительное удлинение, %	Временное сопротивление, МПа
Пруток горячепрессованный	5,0	12,0	170
	7,0	13,0	160
	9,0	13,5	140
Пруток, после сортовой прокатки	3,7×3,7	12,0	200
	3,1×3,1	11,0	225
	2,4×2,4	10,5	230
	2,2×2,2	9,2	240
Проволока, после волочения	1,35	5,6	245
	1,0	4,2	250
	0,7	3,1	255
	0,3	0,7	265

Полученные по разработанной технологии опытные партии деформированных полуфабрикатов были переданы для получения электропроводников, используемых при производстве летательных аппаратов.

Аналогичные исследования с применением метода БПП были проведены для сплава алюминия, легированного Р3М в количестве 1 % масс. ед. Пресс-изделия диаметром 5 и 9 мм, полученные методом БПП при опытно-промышленной апробации новой технологии на установке СПП-400 ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск), имеют характеристики пластичности (относительного удлинения), которые выше (на 5-6 %) по сравнению с данными, полученными при реализации процесса СПП для сплава Al-1 %Р3М.

**В шестой главе** приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов совмещенной обработки для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки из сплавов системы Al-Mg с различным содержанием скандия (табл. 9).

Проанализировав доступную научную литературу, для проведения исследований был выбран сплав 01570. Данный сплав широко используется в промышленности, благодаря своим выдающимся показателям прочности, устойчивости к коррозии и детально изученным реологическим свойствам. Вместе с тем, его высокая стоимость, связанная с наличием дорогостоящего скандия (0,17-0,35 масс. %), ограничивает его более широкое распространение. В качестве альтернативного варианта был рассмотрен сплав 1580, разработанный компанией РУСАЛ. Содержание скандия в данном сплаве удалось понизить до 0,12%, что существенно отличается от показателя сплава 01570 (см. таблицу 9).

Таблица 9 – Химический состав исследуемых сплавов

Сплав	Содержание элемента, масс. %											
	Mg	Mn	Si	Sc	Zr	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	Ni	Al
01570	5,0- 5,2	0,60	0,20	0,25	0,10	0,02	0,16	0,2	0,01	0,10	-	Основа
1580	5,27	0,49	0,13	0,12	0,13	0,02	0,15	0,16	0,011	0,01	0,006	Основа

Данные по реологическим свойствам исследуемых сплавов получены путем кручения и сжатия на установке Gleeble 3800, внесены в базу данных комплекса DEFORM 3D и использовались для моделирования процесса совмещенной обработки исследуемых сплавов.

Данная последовательность совмещенной обработки находит подтверждение в результатах моделирования (рис. 15). Характерная черта формоизменения исследованного сплава заключается в следующем: во время вытяжки, где  $\mu = 3,7$ , и при скорости деформации  $\xi_1 = 0,78 \text{ с}^{-1}$ , процесс установившегося прессования происходит в условиях без полного заполнения области деформации со стороны валка с выступом (рисунок 15 а, в).

Вследствие этого, охлаждение материала в бесконтактной зоне отсутствует, что влечет за собой повышение температуры обрабатываемого полуфабриката со стороны валка, снабженного выступом, относительно температуры со стороны валка с канавкой.

Увеличение степени вытяжки, равно как и скорости деформации, вызывает уменьшение (вплоть до полного исчезновения) бесконтактной зоны. Это характерно для сплавов, демонстрирующих высокое сопротивление деформации.

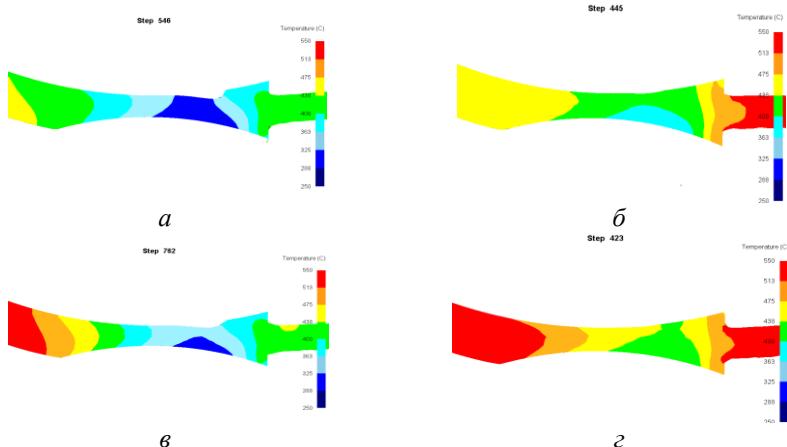


Рисунок 15 – Изменение температуры в очаге деформации для сплава 1580 при вытяжке  $\mu = 3,7$ : *a*, *б* –  $T = 450$  °C; *в*, *г* –  $T = 550$  °C; *а*, *в* –  $\xi_1 = 0,78$   $\text{с}^{-1}$ ; *б*, *г* –  $\xi_2 = 1,57$   $\text{с}^{-1}$

Анализ результатов эксперимента подтвердил, что увеличение скорости деформации влечет за собой повышение температуры полуфабриката при выходе из матрицы. Увеличение коэффициента вытяжки с 3,7 до 11,8 приводит к повышению скорости деформации в зоне прессования. Указанные закономерности изменения параметров совмещенной обработки подтверждаются данными экспериментальных исследований.

Таким образом, с помощью компьютерного моделирования процесса совмещенной обработки для исследуемого сплава с известными реологическими свойствами получены новые данные по температурно-скоростным и деформационным параметрам, которые необходимы при планировании и проведении экспериментальных исследований, а также установлены закономерности распределения температуры металла и скорости деформации по сечению заготовки при получении прутков круглого сечения диаметром 5-9 мм.

В табл. 10 приведены механические свойства полуфабрикатов из сплавов 01570 и 1580 в различном состоянии. Проведя анализ этих сведений, можно заключить, что длинномерные полуфабрикаты, произведенные с использованием новой технологии комбинированной обработки, демонстрируют высокие показатели механических свойств. Важно отметить, что полуфабрикаты из сплава 1580 демонстрируют характеристики пластичности и прочности, сопоставимые с показателями полуфабрикатов из сплава 01570.

Таблица 10 – Механические свойства полуфабрикатов из сплавов 01570 и 1580

Операция	Размеры, мм и состояние	Сплав 01570			Сплав 1580		
		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
БПП	пруток диаметр 9,0 горячедеформированное	306	217	13	291	210	18
Сортовая прокатка	квадрат 7,43×7,43 отожженное	360	288	19	348	222	19
	квадрат 6,90×6,90 отожженное	380	295	15	360	255	14
	квадрат 5,47×5,47 отожженное	370	275	15	390	285	16
	квадрат 5,0×5,0 отожженное	390	300	11	410	285	14
Волочение	диаметр 4,0 отожженное	370	125	12	395	180	14
	диаметр 3,0 холодноде-формированное	410	280	2	410	190	2
	диаметр 3,0 отожженное	335	240	17	370	260	18

Установлено, что прочность сварного шва отожженных образцов практически не изменяется после МКК и находится в интервале 0,75-0,85 от прочности основного металла (табл. 11).

Таблица 11 – Результаты испытаний механических свойств на растяжение образцов после сварки и отжига

Сплав	Направление	Механические свойства		
		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
01570	продольное	380	252	6
	поперечное	357	254	5
1580	продольное	381	255	6
	поперечное	359	293	6

С использованием представленной технологии изготовлены опытные партии сварочной проволоки диаметром 3 мм, из сплавов 01570 и 1580. Данная проволока прошла необходимые испытания, продемонстрировав следующие результаты: падение прочности сварного шва не превышает 10% от нормативного показателя для алюминиевых сплавов в состоянии отжига, установленного ОСТ 92-1114-80 для сварных швов первой категории.

С применением новой технологии произведены экспериментальные партии сварочной проволоки, имеющей диаметр 3 мм. В качестве материала были взяты сплавы 01570 и 1580, исходной заготовкой служили прутки, диаметр которых составлял 9 мм. Получение прутков осуществлялось методом непрерывного литья и последующей деформации прессованием.

нием и прокаткой на оборудовании СПП-400. Производство опытных образцов было организовано в условиях ООО «Завод современных материалов».

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать применение сварочной проволоки из сплава 1580, изготовленной с применением новой технологии с использованием метода БПП, а также режимы термодеформационной обработки при получении деформированных и сварных полуфабрикатов при суммарной степени холодной деформации до 80 %, температуре 350 °C и времени выдержки 1-3 часа при отжиге. Данные режимы обеспечивают оптимальное сочетание механических и эксплуатационных свойств, а также необходимую структуру металла в отожженном состоянии.

**В седьмой главе** представлены новые технические решения, охватывающие состав сплава и конструкцию устройств, предназначенных для совмещенной обработки алюминиевых сплавов, а также результаты практической апробации разработанных технологий получения проволоки из исследуемых сплавов. Испытания проводились с использованием промышленного оборудования: установки непрерывного прессования СПП-400 на ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск) и волочильного агрегата на ООО «Альянс 2008» (г. Красноярск).

Для решения ряда поставленных задач, возникающих при обработке сплавов системы Al-P3M, требуется учесть факторы, связанные с созданием новых сплавов, автоматизацией, улучшением качества пресс-изделий и охлаждением рабочего инструмента процессов совмещенной обработки. Для реализации таких способов разработаны и запатентованы новые технические решения для совмещенной обработки сплавов системы Al-P3M (рис. 16).

Эти технические решения можно разделить на три группы:

- химический состав нового алюминиевого сплава системы Al-P3M (патент РФ №2570684);
- устройства для непрерывной прокатки и прессования;
- устройства для непрерывного литья, прокатки и прессования (патенты РФ №2457914, №2689460, №2792327, №2724758, №2847204).

Заявленный сплав по патенту №2570684 содержит 3 масс. % Р3М, железо 0,15 масс. %, никель 0,05-0,3 масс. % и обладает повышенным уровнем механических и эксплуатационных свойств.

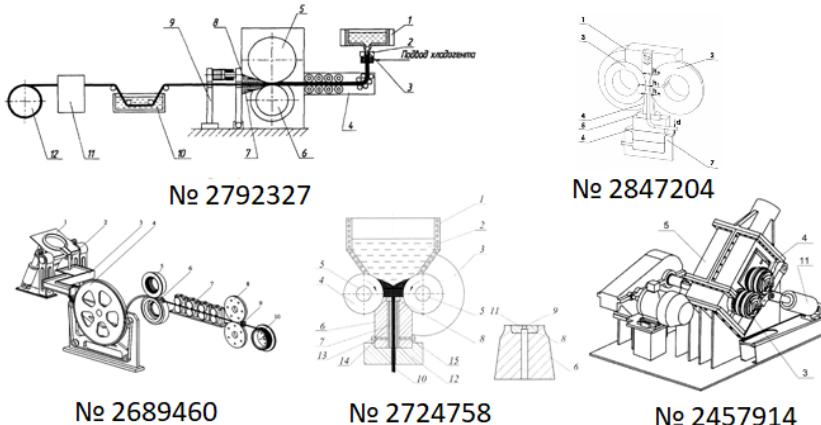


Рисунок 16 – Новые технические решения для совмещенной обработки алюминиевых сплавов

Разработанные технические решения по конструкции оборудования для реализации совмещенных процессов обработки дали возможность внедрить новые технологии получения прутков и проволоки малых диаметров из сплавов системы Al-PЗМ, в том числе для предложенного сплава, а также спроектировать валковый и прессовый инструмент для реализации процессов термодеформационной обработки с использованием роторного и электромагнитного кристаллизаторов для получения заготовки, а также опытно-промышленных установок совмещенной обработки СПП-200 и СПП-400.

С применением новых технических решений проведено опытно-промышленное опробование разработанной технологии получения проволоки из сплава 01417 с применением установки СПП-400.

В процессе волочения проволоки из заготовки, произведенной на СПП-400, удалось получить необходимые механические свойства при конечном диаметре 0,5 мм. Разработанный технологический процесс, примененный в волочении, прошёл успешное производственное тестирование на территории ООО «Альянс 2008».

Исследование микроструктуры полуфабрикатов, полученных литьем в ЭМК и обработкой давлением (см. рисунок 17), привело к следующим выводам. Микроструктура исходной заготовки, произведенной непрерывным литьем с диаметром 18 мм, изготовленной из сплава 01417 (рис. 17, а), в сечении образца демонстрирует наличие мелких интерметаллидных частиц с габаритами  $0,008 \times 0,003$ ;  $0,005 \times 0,002$ ;  $0,01 \times 0,002$ ;  $0,007 \times 0,002$ ;  $0,017 \times 0,011$  мм. В структуре горячедеформированной заготовки диаметром 9 мм после прокатки-прессования (рис. 17, б) также присутствуют мелкие интерметаллиды размерами  $0,006 \times 0,003$ ;  $0,006 \times 0,004$ ;  $0,015 \times 0,005$ ;

$0,010 \times 0,007$  мм. Такая структура металла обеспечивает высокий уровень механических свойств.

Данные механических испытаний проволоки (см. табл. 12) согласуются с результатами металлографического анализа.



Рисунок 17 – Микроструктура непрерывнолитой заготовки диаметром 18 мм (а), горячедеформированного прутка после СПП диаметром 9 мм (б) и проволоки диаметром 0,5 мм (в) из сплава 01417,  $\times 200$

Таблица 12 – Физико-механические свойства проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 в зависимости от различных режимов отжига

Состояние и режимы отжига	Механические свойства		Удельное электросопротивление, Ом $\cdot$ мм $^2$ /м
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	
Деформированное	257	1,2	0,03149
Отожженное ( $T = 350$ °C, $t = 4$ часа)	159	13,4	0,03139
Отожженное ( $T = 400$ °C, $t = 4$ часа)	157	14,2	0,03129
Отожженное ( $T = 450$ °C, $t = 4$ часа)	155	15,8	0,03132
Отожженное ( $T = 500$ °C, $t = 4$ часа)	160	16,7	0,03141
ТУ 1-809-1038-2018	Не менее 142,5	Не менее 8,0	Не более 0,03200

Анализ механических свойств проволоки в деформированном и отожженном состояниях позволяют сделать вывод о том, что увеличение степени суммарной деформации до значений 72-84 % приводит к резкому снижению как прочностных, так и пластических свойств металла на разных маршрутах. При этом наблюдается тенденция снижения механических свойств при понижении температуры отжига. В связи с этим установлено, что температура промежуточного отжига не должна быть ниже 420 °C.

В отношении механических свойств и электрического сопротивления, рассматривается проволока, изготовленная методом волочения с использованием технологии ЭМК-СПП из сплава 01417, их соответствие было подтверждено соответствие ТУ 1-809-1038-2018 (см. таблицу 12).

Таким образом, проанализировав данные, можно заключить: они подтверждают первоначальные заключения. Проволока, изготовленная согласно предложенной технологии, полностью соответствует положениям ТУ 1-809-1038-2018. Это относится к ее механическим характеристикам, параметрам удельного электросопротивления и уровню термостойкости.

**В заключении** описаны основные результаты и выводы, полученные в ходе работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. В рамках развития научных основ совмещенной прокатки-прессования длинномерных деформируемых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов впервые разработана теоретическая база для исследований процессов деформации заготовки прямоугольного поперечного сечения при использовании одного приводного валка и заготовки круглого поперечного сечения при использовании двух приводных валков в закрытых ящичных калибрах, позволяющих снизить энергозатраты на деформацию металла при СПП в среднем на 30-50% по сравнению с использованием двух приводных валков, которые включают теоретический анализ геометрических и энергосиловых параметров процесса, его моделирование и аналитическую оценку температуры деформируемого металла и температуры валков на контакте при прохождении каждой зоны очага деформации без учета и с учетом охлаждения инструмента.

2. В результате решения вариационной задачи и численного моделирования выявлены основные закономерности формоизменения металла при прокатке-прессовании заготовки круглого поперечного сечения в закрытых ящичных калибрах и получены формулы для расчета оптимальной величины удаления матрицы от общей оси валков, показателей напряженного состояния и подводимой валками мощности при условии минимальных энергозатрат на осуществление процесса деформации.

3. Получены регрессионные зависимости реологических свойств для четырех исследуемых сплавов системы Al-P3M.

4. Созданы компьютерные модели процессов совмещенной прокатки-прессования, использование которых дало возможность получить новые научные данные, в том числе по параметрам термодеформационной обработки при использовании заготовки круглого поперечного сечения для исследуемых сплавов, основными из которых являются следующие: температура обработки 480-550 °C; температура инструмента 100-200 °C; обжатие при прокатке не менее 50%; вытяжка при прессовании в диапазоне 6,5-15,3.

5. При использовании этих данных проведены экспериментальные исследования для опытных сплавов с оценкой технологических и энергосиловых параметров совмещенной обработки с целью получения деформированных и отожженных полуфабрикатов и проволоки.

6. Проведена оценка физико-механических свойства длинномерных полуфабрикатов из исследуемых сплавов на всех технологических переделах и установлено, что они соответствуют уровню пластических и прочностных свойств полуфабрикатов, полученных традиционными видами обработки (прессованием, прокаткой).

7. Создана методика реализации последовательности разработки технологических процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов для получения проволоки малых диаметров, с применением которой

проведены комплексные исследования этих процессов применительно к сплавам системы Al-P3M.

8. Разработана технология и произведены опытные серии электротехнической проволоки диаметром до 0,3 мм из сплавов Al-P3M с разным уровнем церия и лантана. Определено, что изготовленная по предложенной технологической схеме ЭМК-СПП-волочение проволока из сплава 01417, в отожженном состоянии, обладает комплексом физико-механических и эксплуатационных характеристик, соответствующих ТУ 1-809-1038-2018.

9. Разработана технология и произведены экспериментальные партии электротехнической проволоки диаметром до 0,3 мм из сплавов системы Al-P3M. В производстве применялась схема БПП-волочение, в сплавах варьировалось содержание церия и лантана. Установлено, что проволока из сплава 01417, изготовленная по данной технологии, после отжига обладает необходимым комплексом физико-механических характеристик и соответствует эксплуатационным требованиям ТУ 1-809-1038-2018.

10. Разработана технология и произведены экспериментальные партии сварочной проволоки диаметром 3 мм, из сплавов 01570 и 1580. Установлено, что предложенный технологический процесс производства сварочной проволоки, включающий в себя три этапа обработки (БПП, сортовую прокатку, волочение) и операции промежуточных отжигов, обеспечивает выпуск высококачественных длинномерных деформированных полуфабрикатов, полностью соответствующих требованиям актуальных стандартов, таких как ГОСТ 7871-2019.

11. Результаты исследований прошли промышленную апробацию на предприятиях металлургического и машиностроительного профиля, а ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных технологий совмещенной обработки только для изготовления проволоки из сплава 01417 составил 7215500 руб. в год.

12. Создан и запатентован ряд технических и технологических решений, применение которых позволяет повысить производительность процесса непрерывной прокатки-прессования и качество получаемых профилей, снизить его трудо- и энергоемкость, а также позволяет получать деформированные полуфабрикаты из заготовок круглого поперечного сечения малопластичных металлов и сплавов с высоким уровнем механических свойств.

13. Результаты работы внедрены в учебный процесс для подготовки магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» (программа 22.04.02.05 «Обработка металлов давлением») и аспирантов по направлению 22.06.01 «Технологии материалов» специальности 2.6.4. (05.16.05) «Обработка металлов давлением».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

### **Монография:**

1. Технологические основы производства проволоки из сплавов алюминия с переходными металлами с применением совмещенных методов термодеформационной обработки: монография / С. Б. Сидельников, Д. С. Ворошилов, В. М. Беспалов [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2025. – 208 с.

### **Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ:**

2. Voroshilov, D. S. Characterization Properties and Structure for Wires from Al-Ce-La System Alloy Via the Method of Combined Rolling-Extrusion with a Single-Driven Roll. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. – 2025. – Т. 23. № 1. – С. 44–53. (К1)
3. Изучение режимов получения проволоки из сплава Al-P3M с применением совмещенных методов обработки и последующего волочения / Д. С. Ворошилов, О. С. Лебедева, Д. Д. Беспалова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21. – № 3. – С. 62–77. (К1)
4. Разработка и исследование процесса бесслитковой прокатки-прессования прутков из алюминиевого сплава 6082 / С. Б. Сидельников, А. С. Берсенев, Ю. А. Горбунов, ..., Д. С. Ворошилов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т. 20. – № 4. – С. 47–57. (К1)
5. Разработка и исследование технологии получения проволоки из сплава Al-P3M с применением совмещенной обработки / С. Б. Сидельников, Д. С. Ворошилов, М. В. Первухин, М. М. Мотков // Цветные металлы. – 2019. – № 9. – С. 63–68. (К2)
6. Совмещенный процесс литья и прокатки-прессования и свойства длинномерных полуфабрикатов из Al-Mg-сплавов, легированных скандием / В. Н. Баранов, С. Б. Сидельников, Е. С. Лопатина, ..., Д. С. Ворошилов [и др.] // Металлургия машиностроения. – 2019. – № 1. – С. 26–29.
7. Voroshilov, D. S. Developing Technology of Obtaining wire from High Alloyed Alloys Al-REM System Using the Methods of Combined Treatment / Voroshilov D. S., Sidelnikov S. B., Rudnitsky E. A. // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 61–65. (К2)
8. Исследование реологических свойств электротехнической катанки из сплавов алюминия с переходными и редкоземельными металлами, полученной методами непрерывного литья и обработки давлением / С.

Б. Сидельников, А. П. Самчук, А. С. Сидельников, Д. С. Ворошилов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 89–95. (К2)

9. Прогнозирование свойств металла при совмещенной обработке сплавов системы Al-P3M на основе поэтапной оценки их механических характеристик / С. Б. Сидельников, Н. Н. Загиров, Е. С. Лопатина, ..., Д. С. Ворошилов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 32–37. (К2)

10. Исследование структуры и оценка свойств литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-P3M с различным содержанием никеля / Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, Т. Н. Дроздова, ..., Д. С. Ворошилов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 1. – С. 45–48. (К1)

11. Выбор оптимальных зазоров в калиbre при совмещенной прокатке-прессовании / С. В. Беляев, С. Б. Сидельников, И. Н. Довженко, ..., Д. С. Ворошилов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 411–421. (К2)

**Публикации в изданиях, входящих в научометрические базы данных Scopus и Web of Science:**

12. Modeling and investigation of ingotless rolling-extrusion process of rods from Al-Zr-Fe and Al-Mg-Sc alloys / S. B. Sidelnikov, A. V. Durnopyanov, E. S. Lopatina, D. S. Voroshilov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – 140. – 3965–3981. (Q1)

13. Electrical wire production from Al - Ce - La alloy rods after electromagnetic mold and combined rolling - extrusion / D. Voroshilov, S. Sidelnikov, D. Darmazhapov [et al.] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2025. – № 60(2). – P. 237–336.

14. Combined rolling-extrusion of various billets from the Al–Ce–La alloy for electrical wire production / D. S. Voroshilov, S. B. Sidelnikov, V. M. Bespalov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – № 131. – P. 4699–4725. (Q1)

15. Influence of the parameters of combined processing and drawing on the structure and properties of conductor semi-finished products from aluminum alloys with additives of rare earth and transition metals / V. M. Bespalov, D. S. Voroshilov, V. A. Bergardt [et al.] // Metals and Materials International. – 2024. – № 30(3). – P. 773–799. (Q1)

16. Development and research of technology for obtaining and properties of welding wire from Al-Mg-Sc alloys using combined methods of thermal deformation treatment / S. B. Sidelnikov, D. S. Voroshilov, E. S. Lopatina [et al.] // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2024. – № 7(3). – P. 384–404. (Q1)

17. Obtaining welding wire from alloy 1580 by technology including the method of combined rolling-extrusion / I. L. Konstantinov, V. N. Baranov, E. Y. Zenkin, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // Applied Physics A. – 2024. – 130. – 403. (Q2)

18. Combined rolling-extrusion of rods from alloy Al-0.5REM using billet after electromagnetic mold / D. S. Voroshilov, S. B. Sidelnikov, V. M. Bespalov [et al.] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2023. – № 58(6). – P. 1133–1138.

19. Simulation of combined rolling-extrusion process for round section billets in closed box caliber / D. S. Voroshilov, S. B. Sidelnikov, I. L. Konstantinov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – № 127. – P. 2893–2910. (Q1)

20. Investigation the structure and properties of deformed semi-finished products produced from chips of Al-Mg alloys system alloyed with scandium / S. B. Sidelnikov, N. N. Zagirov, Yu. N. Loginov, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2023. – № 6. – P. 46–58. (Q1)

21. Deformation behavior during hot processing of the alloy of the Al-Mg system economically doped with scandium / N. N. Dovzhenko, S. V. Rushchits, I. N. Dovzhenko, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 115(7-8). – P. 2571–2579. (Q1)

22. Investigation structure and properties of wire from the alloy of Al-REM system obtained with the application of casting in the electromagnetic mold, combined rolling-extruding, and drawing / S. B. Sidelnikov, D. S. Voroshilov, M. M. Motkov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – № 114. – P. 2633–2649. (Q1)

23. Mechanical properties and microstructure of multi-pass butt weld of plates made of Al-Mg-Zr alloy sparingly doped with scandium / N. N. Dovzhenko, A. I. Demchenko, A. A. Bezrukikh, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – № 113. – P. 785–805. (Q1)

**Научные статьи, входящие в научометрическую базу данных Scopus, опубликованные в трудах научно-практических конференций:**

24. Development of Combined Rolling-Extruding Modes for Producing Longish Deformed Semi-Finished Products from Aluminum Alloy with Low Cerium Content / D. Voroshilov, S. Sidelnikov, V. Bespalov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2021. – № 887. – P. 262–268.

25. Experimental and Analytical Assessment of the Power Parameters of the Combined Rolling-Extruding Process Using a Round Billet from Alloy 01417 Obtained Using an Electromagnetic Mold / S. Sidelnikov, D. Voroshilov,

M. Motkov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2021. – № 887. – P. 300–305.

26. Investigation of the structure and properties of deformed semi-finished products from alloys of the Al-REM system made by the method of ingotless rolling-extruding / V.M. Bespalov, S.B. Sidelnikov, V.A. Berngardt, D. S. Voroshilov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2020. – № 837. – P. 9–15.

27. Study of the Manufacturability of Production and Properties of Welding Wire from Alloy 1580 / S.B. Sidelnikov, V.N. Baranov, N.N. Dovzhenko, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2020. – № 861. – P. 3–8.

28. Modeling the Process of Obtaining Bars from Aluminum Alloy 01417 by Combined Rolling-Extruding Method with Application of the Deform-3D Complex / S.B. Sidelnikov, R.E. Sokolov, D.S. Voroshilov [et al.] // Key Engineering Materials. – 2020. – № 861. – P. 540–546.

29. Development of Combined Machining Modes, Investigation of Mechanical Properties and Structure of Deformed Semi-Finished Products from Alloy 01417 / S. B. Sidelnikov, D. S. Voroshilov, M.M. Motkov [et al.] // Materials Science Forum. – 2020. – № 992. – P. 498–503.

30. Comparative analysis of properties of wires from alloys of Al-REM system, obtained using the methods of continuous extrusion / S. B. Sidelnikov, V. N. Timofeev, Yu. V. Gorokhov, D. S. Voroshilov [et al.] // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2019. – № 8(2S2). – P. 300–304.

31. Computer simulation, analysis of force and temperature-speed parameters of the process of combined machining of Al-Mg-Sc alloys / S. B. Sidelnikov, O. V. Yakivuk, V. N. Baranov, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 544. – 012018.

32. Application and Research Twin Roll Casting-Extruding Process for Production Longish Deformed Semi-Finished Products from Aluminum Alloys / S. B. Sidelnikov, R. I. Galiev, A. S. Bersenev, D. S. Voroshilov // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 918. – P. 13–20.

33. Investigation of mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from the test alloys of Al-Mg system, economically alloyed with scandium / V. N. Baranov, S. B. Sidelnikov, V. F. Frolov, ..., D. S. Voroshilov [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 411.

### **Патенты:**

34. Патент № 2847204 Российской Федерации, МПК B21C 23/00 (2006.01), B22D 11/06 (2006.01). Способ бесслитковой прокатки-прессования прутков и устройство для его реализации : № 2024138405 : заявл. 19.12.2024 : опубл. 30.09.2025 / Сидельников С. Б., Лопатина Е. С.,

Парубок А. В., ..., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский федеральный университет".

35. Патент № 2792327 Российская Федерация, МПК B22D 11/06 (2006.01), СПК B22D 11/06 (2022.08). Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла : № 2021120933 : заявл. 12.10.2020 : опубл. 21.03.2023 / Сидельников С. Б., Лопатина Е. С., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский федеральный университет".

36. Патент № 2724758 Российская Федерация, МПК B22D 11/06 (2006.01), СПК B22D 11/06 (2020.02). Устройство для бесслитковой прокатки и прессования металла : № 2019139742 : заявл. 04.12.2019 : опубл. 25.06.2020 / Сидельников С. Б., Баранов В. Н., Старцев А. А., ..., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский федеральный университет".

37. Патент № 2689460 Российская Федерация, МПК B22D 11/06 (2006.01), B21C 23/00 (2006.01), СПК B22D 11/06 (2019.02), B21C 23/00 (2019.02). Установка для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения сварочной проволоки и лигатурных прутков из цветных металлов и сплавов : № 2018146200 : заявл. 24.12.2018 : опубл. 28.05.2019 / Баранов В. Н., Зенкин Е. Ю., Сидельников С. Б., ..., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр".

38. Патент № 2570684 Российская Федерация, МПК C22C 21/00 (2006.01). Алюминиевый сплав : № 2014127399/02 : заявл. 04.07.2014 : опубл. 10.12.2015 / Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Лопатина Е. С., ..., Ворошилов Д. С. [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет".

39. Патент № 2457914 Российская Федерация, МПК B21C 3/00 (2006.01), B22D 11/00 (2006.01). Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов : № 2011103241/02 : заявл. 31.01.2011 : опубл. 10.08.2012 / Баранов В. Н., Ворошилов Д. С., Галиев Р. И. [и др.] ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр".