



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и

инновациям НИТУ МИСИС

Филонов М.Р.

14 мая 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» на диссертационную работу Ворошилова Дениса Сергеевича «Развитие научных основ и разработка комплекса ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из сплавов системы Al-PЗМ с применением совмещенных методов обработки», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением

Актуальность для науки и практики

В настоящее время в сфере металлообработки алюминиевых сплавов для производства проволоки малого поперечного сечения преобладают энерго- и металлоемкие технологии. Эти многостадийные процессы, охватывающие получение слитков, прессование и/или прокатку, волочение и термообработку, характеризуются значительными потерями металла вплоть до 25-30%, а также и высокими энерго- и трудозатратами. Применение данных технологий для производства электротехнической, сварочной проволоки и заготовок для 3D-печати становится неэффективным при малых объемах производства, что является тенденцией для сплавов системы Al-PЗМ, особенно в производстве ответственной кабельно-проводниковой продукции. Для российской промышленности, обладающей развитой металлургической базой, разработка энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий совмещенной обработки длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов является стратегической задачей. Инновационные подходы, такие как непрерывное литье с использованием электромагнитных кристаллизаторов и последующая обработка на машинах непрерывного прессования (Конформ, Экстроллинг), а также интеграция непрерывного литья с устройствами совмещенной прокатки-прессования (СПП), демонстрируют существенное повышение технико-экономических показателей. Эти технологии позволяют получать заготовки для волочения с улучшенными прочностными и

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за № _____	
Дата регистрации	16.05.2026
Фамилия регистратора	_____

пластическими свойствами, что оптимизирует процесс волочения. Аналогичный эффект достигается при совмещении заливки металла, прокатных и прессовочных операций в едином технологическом процессе, включая метод беслитковой прокатки-прессования (БПП), который обеспечивает более высокую производительность и выход годного металла. Реализация данных технологий требует комплексных теоретических и экспериментальных исследований процессов формоизменения, температурно-скоростных параметров и напряженно-деформированного состояния металла. Научно-технические задачи исследований, представленные в диссертации Ворошилова Д.С., преследовали цель разработки комплекса технических и технологических решений для создания энергоэффективных и материалосберегающих технологий производства полуфабрикатов малых сечений из сплавов системы Al-PЗМ, применяемой в качестве проводов и сварочной проволоки. В диссертации представлен комплекс технических и технологических решений по актуальной научной проблематике исследований.

Научная новизна

1. Разработана теоретическая основа для исследования совмещенной прокатки-прессования (СПП) длинномерных алюминиевых полуфабрикатов. Эта основа включает: методику определения возможности осуществления СПП; оценку того, как изменяется форма металла; расчет температурных, скоростных и силовых параметров процесса. Все это основано на новых формулах и результатах компьютерного моделирования. Теоретическая база охватывает как прямоугольные заготовки с одним валком, так и круглые заготовки с двумя приводными валками в закрытых калибрах.
2. Создана математическая модель процесса СПП для круглых заготовок в закрытых калибрах, основанная на вариационных методах. Эта модель позволила впервые получить новые научные данные о геометрических, технологических и силовых параметрах процесса. Это, в свою очередь, открыло возможности для практического применения СПП при обработке алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами (РЗМ).
3. Изучены реологические свойства исследуемых сплавов с помощью методов осадки и кручения. Полученные данные позволили построить регрессионные модели, которые, в свою очередь, дали возможность провести компьютерное моделирование процессов совмещенной обработки.
4. С помощью моделирования МКЭ выявлены закономерности изменения формы металла, распределения температуры, скоростей течения и силовых параметров в зоне деформации при СПП круглых заготовок. Эти закономерности были установлены для получения прутков из высоколегированных и низколегированных алюминиевых

сплавов системы Al-Ce-La.

5. Установлены закономерности изменения механических свойств изделий из алюминиевых сплавов с РЗМ, полученных методом СПП и последующим волочением с отжигом. Это позволило достичь требуемых технических характеристик (механических и электрофизических свойств).

6. Получены новые научные данные и установлены закономерности изменения механических свойств изделий из алюминиевых сплавов с РЗМ, полученных методом бесслитковой прокатки-прессования (БПП) и последующим волочением. Это позволило упростить процесс получения проволоки малых сечений из высоколегированного сплава системы Al-Ce-La (01417).

7. Установлены новые научные данные и закономерности изменения механических свойств изделий из алюминиевых сплавов системы Al-Mg с добавкой скандия, полученных методом БПП и последующим волочением с отжигом. Это позволило достичь необходимых физико-механических свойств.

Значимость полученных автором диссертации результатов для науки и практики

1. Разработан и успешно применен метод последовательной обработки алюминиевых сплавов для получения длинномерных полуфабрикатов. Этот метод позволил провести всесторонние исследования технологии производства проволоки технического назначения из четырех сплавов системы Al-РЗМ.

2. Созданы компьютерные модели процессов обработки, которые использовались для анализа изменений формы, силовых и энергетических параметров, а также температурно-скоростных режимов при совмещенной обработке алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами (РЗМ).

3. Определены и отработаны оптимальные режимы получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из круглых заготовок сплава 01417 после электромагнитной кристаллизации (ЭМК) методом СПП с промежуточными отжигами. Это позволило внедрить новую энергосберегающую технологию производства проволоки с использованием установок совмещенной обработки.

4. На основе результатов моделирования и экспериментов разработан комплекс ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из исследуемых сплавов Al-РЗМ с использованием совмещенных методов обработки. По сравнению с традиционным горячим прессованием на гидравлических прессах, новая технология снижает энергопотребление на 30-50% и увеличивает выход годного металла на 18-20%.

5. Разработаны и испытаны технологические, деформационные и температурно-скоростные режимы непрерывного прессования для лабораторной установки СПП-200 и промышленной установки СПП-400 с последующим изготовлением опытных партий деформированных полуфабрикатов малого диаметра из сплавов системы Al-Ce-La, из непрерывнолитой заготовки после ЭМК, а также методом БПП.
6. Изготовлены опытно-промышленные партии проволоки малого сечения (диаметром 0,3 мм) из сплава 01417. Проведенные независимые испытания механических, электрических свойств и термостойкости подтвердили их соответствие регламентированным требованиям.
7. Установлены оптимальные режимы бесслитковой прокатки-прессования для получения заготовок под последующее волочение сварочной проволоки из сплавов 1580 и 01570.
8. Предложена технологическая схема производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов Al-Mg с разным содержанием скандия. Схема включает три этапа (БПП, сортовая прокатка, волочение и отжиг) и позволяет получить сварочную проволоку диаметром 3 мм. Применение такой проволоки обеспечивает высокое качество сварных швов и прочность, достигающую 75-85% от прочности основного металла.
9. Созданы и запатентованы шесть технических решений (способ, установки, устройства и сплав), на основе которых разработаны и изготовлены специализированный инструмент и установка для совмещенной обработки алюминиевых сплавов. Эти разработки направлены на снижение трудо- и энергозатрат, а также на повышение производительности.

Структура и содержание работы

Представленная работа состоит из введения, 7 глав и заключения. Содержит 275 страниц машинописного текста, 141 рисунок, 62 таблицы, библиографический список из 261 наименования и 8 приложений, подтверждающих значимость результатов для науки и производства.

Во введении описаны цель и задачи исследования, показаны актуальность и прикладное значение работы, а также научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В первой главе автором 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 термомодеформационной обработки, а также формоизменению алюминиевых полуфабрикатов, получаемых по технологиям с совмещением различных схем деформации в одном узле обработки. Показана последовательность разработки технологических процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов для получения проволоки малых диаметров из сплавов алюминия с переходными металлами. Каждый из этапов включает аналитические, теоретические и экспериментальные исследования процессов получения заготовок методом непрерывного литья, их деформацию путем применения совмещенной прокатки-прессования и дальнейшего волочения полученных прутков до заданных размеров проволоки. Задачи исследований сформулированы на основе рассмотренных вопросов и сделанных выводов.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований и моделирования процессов совмещенной прокатки-прессования с одним и двумя приводными валками, а также приведены теоретические исследования геометрических параметров очага деформации и моделирование асимметричного процесса СПП с двумя приводными валками с использованием заготовки круглого сечения. Разработана методика расчета коэффициента реализуемости процесса СПП с одним и двумя приводными валками для сплава 01417 при различных степенях относительной деформации при прокатке и коэффициентах вытяжки при прессовании. Установлены закономерности изменения температуры металла и инструмента при прокатке-прессовании сплава 01417, определены 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. Разработаны теоретические основы 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, включающие методику определения реализуемости процесса СПП, оценку формоизменения металла, температурно-скоростных и энергосиловых параметров с применением полученных расчетных формул и результатов компьютерного моделирования. В работе предложена математическая модель для анализа процесса совмещенной прокатки-прессования круглых заготовок в закрытых калибрах ящичного типа, основанная на применении вариационных методов. Разработанная модель позволяет вычислять геометрические характеристики и энергосиловые

параметры процесса. Модель интегрируется с технологиями непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор для производства заготовок и последующего волочения проволоки электротехнического назначения.

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-PЗМ. Проведено исследование реологического поведения сплава 01417. Разработана трехмерная цифровая модель процесса СПП цилиндрической заготовки. Разработана всесторонняя методика, совмещающая экспериментальные исследования и аналитическое моделирование, направленная на оценку осуществимости процесса СПП и вычисление силовых характеристик при деформации цилиндрической заготовки из сплава 01417. Проведены экспериментальные исследования по получению прутков диаметром 5 мм из непрерывнолитой заготовки из сплава 01417. Выполнено исследование микроструктуры металла, выявлены зависимости изменения его механических характеристик. Разработаны новые деформационные режимы непрерывного прессования, маршруты волочения, а также определены параметры промежуточного и окончательного отжига для получения проволоки из сплава 01417 с использованием установки СПП-400 в промышленных условиях.

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 %. Исследованы реологические характеристики непрерывнолитых заготовок диаметром 12 мм, полученных из экспериментального сплава Al+1%PЗМ. Определены конструктивные параметры валкового и прессового инструмента, а также технологические режимы прокатки-прессования. Исследованы особенности изменения формы, распределение температур и напряжений, а также вычислены силовые параметры вдоль зоны деформации при изменении частоты вращения валков. Описаны режимы получения проволоки диаметром 2 мм из прутков диаметром 5 и 9 мм без промежуточных отжигов. Установлены закономерности изменения механических и электрофизических свойств полуфабрикатов в зависимости от режимов обработки.

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 лантана)

до 7 % (сплав 01417) и низколегированного сплава до 1%. Проведен анализ полученных экспериментальных данных по оценке энергосиловых параметров процессов БПП. Проведена оценка структуры деформированных полуфабрикатов из сплавов 01417 и Al-1%РЗМ и установлено влияние на нее таких факторов, как степень и скорость деформации, температура обработки. Представлены графические зависимости механических свойств прутков, полученных методом БПП, от варьируемых факторов. Предложена и опробована технологическая схема для производства пресс-изделий небольшого поперечного сечения из сплава 01417. Произведен расчет маршрута волочения проволоки из сплава 01417 на волочильной машине со скольжением типа «Т 10 N.F.S.». Предложенные технологические режимы позволили обеспечить при заданных температурно-скоростных и деформационных параметрах процесса механические свойства и удовлетворительные значения электросопротивления проволоки в соответствии с регламентированным ТУ.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов совмещенной обработки для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки из сплавов 1580 и 01570. Определены реологические свойства для нового сплава 1580 в широком диапазоне изменения температурно-скоростных и деформационных параметров. Разработаны режимы отжига, которые способствуют получению сварочной проволоки, обладающей требуемыми эксплуатационными и механическими свойствами. Предложена технологическая схема, обеспечивающая производство сварочной проволоки, включает в себя три основных этапа: подготовку прутка (БПП), сортовую прокатку и волочение, а также процессы термообработки, в частности, отжиги. Разработаны режимы, позволяющие изготавливать длинномерные деформированные полуфабрикаты высокого качества, соответствующие установленным стандартам. Проведены испытания сварных образцов на межкристаллитную коррозию, при этом был получен качественный шов, имеющий прочность 75-85% от прочности основного материала.

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. Разработаны защищенные шестью патентами РФ новые технические решения на конструкции устройств для совмещенной прокатки-прессования, бесслитковой прокатки и прессования, на основе которых спроектированы, изготовлены и опробованы инструмент, валковые и прессовые узлы установок, а также один сплав. Определены рациональные режимы деформирования, температурные и скоростные характеристики

для процесса непрерывного прессования, используемого на установке СПП-400 на основе проведенного компьютерного моделирования. Произведены промышленные партии проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, целиком отвечающая параметрам, регламентированным техническими условиями. Представлены результаты промышленной апробации разработанных технологических режимов для проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417 с подтверждающими в приложениях актами.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

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.).

Исследования проводились автором в качестве руководителя или исполнителя в рамках программ Министерства науки и высшего образования РФ по постановлению Правительства РФ №218, государственного задания на науку, а также по проектам РНФ и РФФИ.

Результаты исследований прошли апробацию на различных промышленных предприятиях: ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск), ООО «Научно-производственный центр Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск), ООО «Альянс 2008» (г. Красноярск), АО «Красмаш» (г. Красноярск), СОАО «Гомелькабель» (г. Гомель, Республика Беларусь).

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.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением:

- п. 1. Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов;
- п. 2. Исследование способов, процессов и технологий обработки давлением металлов,

сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования;

п. 3. Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации;

п. 5. Математическое описание процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с целью создания математических моделей, способов, процессов и технологий;

п. 6. Разработка способов, процессов и технологий обработки металлов давлением, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий;

п. 8. Исследование пластической деформации металлов в процессах обработки давлением, совмещенных с другими технологическими процессами обработки металлов с целью разработки энергоэффективных и материалосберегающих технологий.

Замечания по диссертации и автореферату

1. Из текста диссертации недостаточно понятно какой РЗМ в мишметалле оказывает большее влияние на физические свойства полученных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Ce-La.

2. Из представленного анализа научной и технической литературы недостаточно ясны ограничения известных способов совмещённой обработки (Конформ и Экстроллинг).

3. Не ясно назначение патентного поиска по сплавам Al с РЗМ в главе 1.2.3., которое уместнее выглядело бы в главе 1.2.2.

4. Достоверность результатов исследования во введении описана слишком обще. Не указаны объёмы выборок, повторяемость опытов, доверительные интервалы и погрешности, критерии статистической значимости, методика обработки разброса свойств.

5. Химический состав сплава 01417, указанный в таблице 3.1 вызывает вопрос: Ce 4,58%, La 0,22%, Pr 0,1%, Nd < 0,1%, но в графе «Сумма (Ce+La+РЗМ)» указано 7-9%. По приведённым числам сумма РЗМ получается около 5%, а не 7-9%.

6. В главе 3.1 указано, что реологические свойства получены методом кручения «на установке СПП-200», что противоречит её назначению. Необходимо уточнить фактическое оборудование и методику испытаний.

7. В главе 6.3 для модели в DEFORM-3D указаны изотропность материала,

трение и число элементов, но недостаточно раскрыты тепловые граничные условия, такие как коэффициент теплопередачи, начальные температуры инструмента, теплопроводность и теплоёмкость материала заготовки.

8. При исследовании структуры сварных соединений полуфабрикатов (глава 6.5) в тексте указана ширина зоны термического влияния размером 1-2 микрометра, что противоречит приведённому снимку.

9. В изображении структуры сплава 01417 (рис. 7.14 в диссертации, глава 7) не указана масштабная линейка.

10. В главе 7 диссертации не во всех таблицах механических свойств приведены значения предела текучести.

Указанные замечания не снижают общую научную ценность и практическую значимость диссертационной работы, которая в целом заслуживает положительной оценки.

Заключение

Диссертация на тему «Развитие научных основ и разработка комплекса ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из сплавов системы Al-P3M с применением совмещенных методов обработки» представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Технологические и технические решения, выводы и рекомендации обоснованы, а результаты работы достаточно полно освещены в научной печати. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и в необходимом объёме отражает ее основные результаты и выводы. Полученные результаты диссертации Ворошилова Д.С. направлены на решение крупной, имеющей важное значение, научной проблемы, которая заключается в разработке теоретических и технологических основ для эффективного производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-P3M с помощью совмещенных методов обработки давлением.

Рассмотренная диссертационная работа соответствует критериям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а ее автор Ворошилов Денис Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением.

Диссертация и автореферат на нее рассмотрены, а отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры обработки металлов давлением, протокол №9/н от 13.05.2026

года. На заседании присутствовало 23 сотрудника кафедры: 5 д.т.н., 10 к.т.н.
Результаты голосования: «за» – 23, против – 0, воздержавшихся - 0.

Заведующий кафедрой
обработки металлов давлением,
кандидат технических наук
по специальности
05.16.05 – Обработка металлов давлением,
Доцент



Алешенко
Александр Сергеевич

Профессор кафедры
обработки металлов давлением,
доктор технических наук
по специальности
05.16.05 – Обработка металлов давлением,
Профессор



Галкин Сергей
Павлович

Адрес организации: 119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4 стр. 1
Наименование организации: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС)
Электронный адрес: kancela@misis.ru Телефон: +7 495 955-00-32

Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1 тел.
8(495) 9550032, E- mail: kancela@misis.ru