

ОТЗЫВ

официального оппонента Уманского А.А. на диссертацию 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 к защите в диссертационном совете 24.2.324.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением

Актуальность темы

Современная промышленность, включая авиастроение, ракетостроение, кораблестроение и энергетику, активно внедряет редкоземельные металлы (РЗМ) в алюминиевые сплавы. Это позволяет достичь уникальных механических и электрофизических характеристик, однако даже незначительное увеличение доли РЗМ резко повышает стоимость продукции. Данная проблема особенно актуальна для производства длинномерных полуфабрикатов малого сечения, таких как катанка и проволока. Классические методы обработки металлов давлением для получения проволоки, особенно тонкой, являются энергоемкими и многостадийными, что приводит к существенным потерям металла. Более того, существующее оборудование не всегда способно производить продукцию малого сечения из прочных высоколегированных сплавов, а также не обеспечивает быструю переналадку на другие типоразмеры или сплавы. Оборудование, ориентированное на крупносерийное производство, не отвечает современным потребностям в гибком выпуске небольших партий проволоки из сплавов Al-PЗМ. Эффективным подходом к решению этих задач являются технологии совмещенной обработки, которые интегрируют литье, прокатку и прессование в единый технологический процесс. Разработанные методы, такие как совмещенная прокатка-прессование и комбинированное литье с последующей прокаткой-прессованием, демонстрируют высокую эффективность при производстве малых партий проволоки из сплавов Al-PЗМ, характеризуясь низкими энергозатратами и минимизацией потерь металла.

Диссертационная работа Д.С. Ворошилова направлена на решение актуальной проблемы разработки ресурсосберегающих технологий для производства востребованной в промышленности проволоки из сплавов системы Al-PЗМ.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы

Достоверность обеспечивается за счет использования общепризнанных

доказанных методов теории обработки металлов давлением, математических моделей и статистических данных. Также результаты исследований подтверждаются в ходе проведения лабораторных испытаний и промышленной апробации. Результаты диссертационной работы отражены в 39 публикациях, в том числе в 1 монографии, 10 статьях из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, 22 статьях в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science и 6 патентах.

Общая оценка содержания диссертационной работы

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.

Введение диссертационного исследования освещает актуальность проблемы получения проволоки из сплавов системы Al-PЗМ, а также систематизирует предшествующие научные достижения отечественных и зарубежных исследователей в данной области. В рамках введения определены цель и задачи работы, изложены методологические основы и примененные методы исследования. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Также введение содержит информацию о структуре диссертации, перечень опубликованных работ и сведения о промышленном внедрении результатов.

В **первой главе** представлен всесторонний литературный обзор, в котором раскрываются преимущества внедрения редкоземельных металлов (РЗМ) в алюминиевые сплавы. Обзор охватывает применение 2 сплавов системы Al-Ce-La в качестве электротехнической проволоки и 2 сплавов системы Al-Mg-Sc (1580 и 01570) в качестве сварочной проволоки. Особое внимание уделено анализу новейших разработок и патентной активности в области перспективных технических решений по термомодеформационной обработке исследуемых сплавов с использованием комбинированных и совмещенных методов. Итоговые выводы, полученные в результате рассмотрения данных вопросов, послужили фундаментом для формулирования цели и задач настоящего исследования.

Вторая глава содержит теоретические результаты по совмещенной прокатке-прессованию (СПП) алюминиевых сплавов при различных схемах термомодеформационной обработки. Проведены теоретические исследования геометрических параметров очага деформации и моделирование асимметричной СПП. В частности, моделировался процесс с одним приводным валком, а также с двумя приводными валками при использовании заготовок круглого сечения. Дополнительно выполнено математическое моделирование СПП круглых заготовок в закрытых ящичных калибрах. На

основании проведенных расчетов и моделирования процесса СПП с одним приводным валком для экспериментальных исследований были представлены рекомендуемые параметры величины обжатия при прокатке, величины удаления матрицы от плоскости наименьшего сечения калибра с учетом коэффициента асимметричности процесса, а также максимального коэффициента вытяжки при прессовании.

В третьей главе проводится углубленное исследование технологии получения и свойств электротехнической проволоки, изготовленной из сплавов системы Al-PЗМ, с использованием комбинированных подходов термомеханической обработки. Представлены результаты анализа реологических характеристик сплава 01417, которые использовались для компьютерного моделирования, а также описание используемого оборудования и экспериментальной методики. Выполнено компьютерное моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования. Приводятся эмпирические данные, полученные в ходе экспериментальных исследований. Исследована микроструктура литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов из сплава 01417. Выявлены закономерности изменения его механических и электрофизических свойств в ходе деформации при процессе совмещенной прокатки-прессования заготовки, полученной в электромагнитном кристаллизаторе.

В четвертой главе представлено исследование, посвященное разработке технологии получения и анализу свойств электротехнической проволоки из сплава системы Al-PЗМ со сбалансированным содержанием церия и лантана (суммарно до 1%). Работа включает детальный анализ реологических характеристик, описание экспериментальной базы и методики исследований сплава алюминия с 1% PЗМ. Выполнено моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования сплава Al-1% PЗМ, а также представлены ключевые экспериментальные результаты. Исследована микроструктура литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов из данного сплава. Проведены исследования параметров термообработки полученных прутков и проволоки при различных режимах обработки и отжига. Результаты исследований показали, что для выполнения требований стандарта ИЕС 62004-07 для режима АТ1 рекомендуется применение режима отжига при температуре 230 °С и выдержке 1 час.

Пятая глава посвящена описанию технологии получения проволоки с использованием метода бесслитковой прокатки-прессования (БПП). Рассматриваются практические аспекты производства электротехнической проволоки из сплавов Al-PЗМ. Изложена методика проведения экспериментальных работ по БПП. Приведены результаты экспериментов по изготовлению прутков из сплава 01417 и сплава Al-1% PЗМ методом БПП, а

также разработка новых производственных технологий для получения проволоки из этих прутков. Разработана технологическая схема получения электротехнической проволоки путем использования трех переделов (метод БПП, сортовая прокатка, волочение) с целью получения опытных партий проволоки. Произведен расчет маршрута волочения проволоки из сплава 01417 на волочильной машине со скольжением, и установлены параметры режимов волочения для получения проволоки диаметром 0,3 мм.

Шестая глава содержит научные результаты, касающиеся технологии получения и свойств сварочной проволоки из скандийсодержащих алюминий-магниевого сплавов, полученной с применением комплексных методов термомеханической обработки. В данной главе были исследованы реологические характеристики и проведено моделирование процесса совмещенной обработки сплава 1580, а также детально описаны экспериментальные подходы и применяемое оборудование. Изучены структурные и физико-механические свойства деформированных, отожженных и сварных полуфабрикатов из сплавов 1580 и 01570. Установлено соответствие свойств сварочной проволоки современным стандартам, таким как ГОСТ 7871-2019. Установлено, что снижение прочности сварного шва на образцах, сваренных с использованием разработанной сварочной проволоки, не превышает 10% от значения, регламентированного стандартом для алюминиевого сплава в мягком состоянии, что соответствует сварным швам первой категории.

В **седьмой главе** диссертации изложены результаты практической реализации научных изысканий. Представлены инновационные технические решения, направленные на совмещенную обработку алюминиевых сплавов. Среди представленных технических решений имеются устройства для непрерывного литья, прокатки и прессования, а также разработанный химический состав нового алюминиевого сплава системы Al-PZM. Указанные решения дали возможность реализовать новые технологии получения проволоки малых диаметров из сплавов системы Al-PZM, в том числе для предложенного сплава, а также спроектировать валковый и прессовый инструмент для реализации процессов термомеханической обработки с использованием роторного и электромагнитного кристаллизаторов для получения заготовки, а также опытно-промышленных установок совмещенной обработки СПП-200 и СПП-400. Было проведено опытно-промышленное тестирование разработанной методики получения проволоки диаметром до 0,5 мм из сплава 01417 с применением промышленного оборудования СПП-400. Экспериментальные данные подтвердили, что образцы проволоки, произведенные с использованием предложенной технологии, демонстрируют комплекс механических и

электрофизических свойств, отвечающих нормативным требованиям, после проведения финальной термической обработки. Рациональные параметры процесса непрерывного прессования на установке СПП-400, включая режимы деформации, температурные и скоростные показатели, были определены на основе результатов компьютерного моделирования.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Научная новизна работы

Наиболее значимые научные результаты, полученные автором диссертации, включают:

- разработку теоретических основ для моделирования процессов деформации заготовок прямоугольного и круглого сечения в закрытых ящичных калибрах, учитывающих специфику использования одного или двух приводных валков;
- создание математической модели совмещенной прокатки-прессования круглых заготовок в закрытых ящичных калибрах с применением вариационных методов;
- экспериментальное определение реологических свойств сплавов системы Al-PЗМ;
- установление фундаментальных закономерностей формоизменения металла, температурных полей, скоростных режимов и энергосиловых характеристик в очаге деформации в процессе СПП;
- выявление закономерностей изменения механических свойств изделий из сплавов Al-PЗМ, полученных методом СПП с последующим волочением.
- исследование влияния комбинированного процесса БПП и волочения на механические свойства изделий из сплавов Al-PЗМ;
- анализ влияния БПП и последующего волочения на механические свойства изделий из сплавов Al-Mg, легированных скандием в различных концентрациях.

Теоретическая и практическая значимость работы

Ключевые практические достижения автора диссертации включают:

- создание методики, охватывающей последовательность технологических операций (прокатка, прессование, волочение, термообработка) для производства длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов;
- разработку компьютерных моделей, позволяющих детально анализировать процессы формоизменения, энергосиловые и температурно-скоростные параметры при совмещенной обработке алюминиевых сплавов с PЗМ;
- внедрение новой энергосберегающей технологии производства проволоки, использующей заготовки круглого сечения после ЭМК и установки СПП;
- разработку комплекса ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из сплавов системы Al-PЗМ. Применение совмещенных методов

обработки в рамках этих технологий обеспечивает существенное снижение энергоемкости (на 30-50%) и повышение выхода годного металла (на 18-20%) по сравнению с традиционным прямым прессованием;

- успешное получение опытно-промышленных партий проволоки малого диаметра (до 0,3 мм) из сплава 01417;

- определение рациональных режимов деформации для эффективного производства сварочной проволоки из сплавов 1580 и 01570 методом бесслитковой прокатки-прессования;

- реализацию 6 запатентованных в РФ технических и технологических решений, направленных на повышение эффективности, производительности и снижение затрат (трудовых и энергетических) в рамках совмещенных процессов.

Соответствие паспорту научной специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением

Представленная диссертационная работа охватывает следующие пункты, соответствующие паспорту 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.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. Формулировки пунктов 5, 6 и 7 научной новизны дословно повторяют друг друга в преамбуле («Получены новые научные данные и

установлены закономерности изменения механических свойств пресс-изделий из сплавов алюминия системы ...»), после которой следует детализация объекта исследования (наименование сплава, способа получения изделий). Стилистически более правильным и более логичным представляется объединить указанные пункты в один пункт с общей преамбулой.

2. В диссертации представлены сведения об ожидаемом экономическом эффекте в размере 7,2 млн. руб/год от внедрения разработанных технологий совмещенной обработки только применительно к проволоке из сплава 01417. В то же время в рамках диссертационного исследования разработаны технологические решения по получению изделий из алюминиевых сплавов широкой номенклатуры, направленные на улучшение комплекса их свойств и снижение затрат на производство. Представляется, что дополнительный расчет ожидаемого экономического эффекта от всех основных решений, даже при отсутствии подтверждения эффекта Актом от предприятия, позволил бы акцентировать внимание на наличии значительного вклада полученных результатов в развитие отечественной металлургической отрасли. Данный аспект является значимым, поскольку важное хозяйственное значение полученных результатов является критерием, которому должна отвечать докторская диссертация.

3. Наличие ссылок на литературные источники во введении при характеристике актуальности работы является не совсем корректным и не является общепринятым. Аналогично не совсем корректным является наличие ссылок на значительное количество источников одновременно. Так, например, на стр. 17 диссертации имеется ссылка на 70 источников во вводной фразе подраздела 1.2.1., на стр. 33 имеется ссылка на 27 источников одновременно (со 118 по 144 источник согласно списку литературы).

4. В первой главе диссертации представлены результаты исследований влияния на свойства электротехнической проволоки только ограниченного количества РЗМ (церий, лантан и празеодим). Не понятно, почему выбраны именно эти элементы и по какой причине не представлена информация о других РЗМ, используемых в составе алюминиевых сплавов?

5. В ходе моделирования рассматриваемых процессов с помощью программного комплекса DEFORM 3D исследовано значительное количество варьируемых режимов при решении объемной задачи. Почему не рассматривался вариант плоской задачи, который мог бы значительно сократить временные затраты на моделирование?

6. На стр. 49 диссертации приводится информация: «В ходе проведенных исследований выявлено, что при входе заготовки в зону деформации происходит её изгиб в направлении приводного вала». Также указанная информация подтверждается на рис. 2.2 а (стр. 50). При этом отсутствуют пояснения по вопросу, постоянный ли это эффект при использовании одного приводного вала или это происходит на какой-то определенной стадии процесса СПП?

7. Не ясно, с какой целью проведены экспериментальные исследования сопротивления деформации сплава 01417 и сплава системы Al-РЗМ с

пониженным содержанием церия и лантана при комнатной температуре (20°C) – рисунки 3.1 и 4.1 в диссертации. Очевидно, что в производственных условиях деформационная обработка сплавов без предварительного нагрева проводиться не будет в связи со значительными нагрузками на оборудование.

8. В пункте 3 научной новизны работы и пункте 3 заключения говорится о получении регрессионных моделей (регрессионных зависимостей) реологических свойств для исследуемых сплавов системы Al-PЗМ. Однако сами регрессионные зависимости сопротивления деформации сплавов от параметров их деформации (температура и скорость деформации, вытяжка) в диссертации не приводятся, имеются только графические зависимости (рисунки 3.1, 4.1).

9. В диссертации представлены многочисленные фотографии микроструктуры прутков, проволоки и полуфабрикатов рассматриваемых алюминиевых сплавов. При этом описание указанных микроструктур в ряде случаев является малоинформативным, либо отсутствует. Например, в пояснении к рисункам 3.13, 4.5 и к таблицам 4.9, 4.10 автор утверждает, что имеет место мелкозернистая структура, но информация о размере зерен при этом не приводится; описание микроструктуры, представленной на рисунке 3.14, отсутствует.

10. Имеются отклонения от правил оформления рисунков. В частности, информация на рисунках 1.1-1.3, характеризующих мировое производство и спрос на PЗМ, а также распределение месторождений PЗМ по странам, представлена на английском языке без пояснений и перевода на русском языке. На рисунках 1.23, 2.21-2.23, 5.14-5.22, 6.16 в подрисуночных подписях отсутствуют пояснения буквенных обозначений. Также некоторые рисунки в диссертации имеют низкое качество, плохо читаемы указанные на рисунках размеры, например, рисунки. 2.5, 2,7-2.9, 3.3, 3.8, 3.9 и 3.13.

Вышеприведенные замечания не ставят под сомнение общую положительную оценку работы и ее основные выводы, имеют уточняющий характер, либо являются дискуссионными, а также не снижают научной ценности и практической значимости.

Заключение по работе

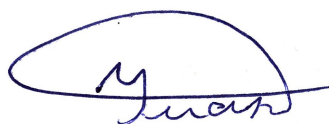
Диссертация Ворошилова Дениса Сергеевича «**Развитие научных основ и разработка комплекса ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из сплавов системы Al-PЗМ с применением совмещенных методов обработки**» выполнена на актуальную тему, является завершенной научно-квалификационной работой, обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью. Работа соответствует паспорту специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением. Результаты работы прошли апробацию на промышленных предприятиях и были представлены на всероссийских и международных конференциях. Материалы диссертации являются достоверными и опубликованы в научной печати в достаточном объеме. Представленные в диссертации Ворошилова

Д.С. технические и технологические решения на основе полученных результатов, направлены на решение актуальной научной проблемы, такой как получение прутков и проволоки из сплавов системы Al-Ce-La и Al-Mg-Sc с помощью совмещенных методов обработки, что позволяет снизить потери металла и энергозатраты.

Представленная диссертация соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждения ученых степеней» №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Ворошилов Денис Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением.

Я, Уманский Александр Александрович, выражаю согласие на включение своих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени доктора технических наук Ворошилова Дениса Сергеевича и их дальнейшую обработку.

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



07.05.2026

Специальность, по которой была защищена диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук – 2.6.4. Обработка металлов давлением

Рабочий адрес:

654007, Кемеровская область - Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

Телефон: +7 (3843) 74-89-12, E-mail: umanskiy_aa@sibsiu.ru

Подпись Уманского А.А. удостоверяю:

Начальник отдела кадров



Миронова Т.А