

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им.
Г.И. Носова», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, ПО
ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 02.06.2026 № 4

О присуждении Ворошилову Денису Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Развитие научных основ и разработка комплекса ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из сплавов системы А1-РЗМ с применением совмещенных методов обработки» по специальности 2 .6.4. Обработка металлов давлением принята к защите 27.02.2026 г. (протокол заседания № 2) диссертационным советом 24.2.324.01, созданном на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Ворошилов Денис Сергеевич, «08» февраля 1986 года рождения диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка технологии получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы А1-РЗМ с применением методов совмещенной обработки» защитил в 2012 году в диссертационном совете Д212.099.10, созданном на базе государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

Диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук подготовил в докторантуре при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский

федеральный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

В настоящее время работает в должности заведующего кафедрой «Обработка металлов давлением» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук, Сидельников Сергей Борисович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра «Обработка металлов давлением», профессор.

Официальные оппоненты:

1. Колесников Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Оборудование и технологии прокатки» профессор,

2. Шварц Данил Леонидович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Обработка металлов давлением», заведующий кафедрой,

3. Уманский Александр Александрович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», институт металлургии и материаловедения, директор,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», в своем положительном отзыве, подписанном Алещенко Александром Сергеевичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой обработки металлов давлением, Галкиным Сергеем Павловичем, доктором технических

наук, профессором, профессором кафедры обработки металлов давлением, указали, что диссертация Ворошилова Дениса Сергеевича ... «представляет собой законченную 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 объеме 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-PZM 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.».

Соискатель имеет более 240 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 39 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, опубликовано 10 работ, в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus, опубликовано 22 работы, издана 1 монография, получено 6 патентов на изобретения РФ. Сведения об опубликованных работах достоверны. Авторский вклад соискателя объемом 6,5 п.л. в опубликованных работах общим объемом 30,8 п.л. состоит в постановке начальных и граничных условий конечно-элементного моделирования и выполнении расчетов; в описании напряженно-деформированного и температурного состояния металла при совмещенной прокатке-прессовании во взаимосвязи с получаемой структурой и механическими свойствами; в выполнении экспериментов с применением уникальной научной установки; в разработке новых технологических схем совмещенных процессов и получении прутков и

проволоки; в анализе, интерпретации, обобщении и систематизации теоретических и экспериментальных результатов, формулировке выводов, подготовке научных работ к опубликованию в открытой печати.

К наиболее значимым научным публикациям относятся:

1. 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.

2. Изучение режимов получения проволоки из сплава Al-PЗМ 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все отзывы положительные):

1. ФГБОУ ВО «ЧГУ» (г. Череповец), подписанный доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой металлургии, машиностроения и технологического оборудования Болобановой Наталией Леонидовной. Замечания: 1. В работе показано, что использование одного приводного вала позволяет снизить энергозатраты на деформацию. Однако в автореферате физический механизм этого снижения этого снижения описан

недостаточно подробно: не уточнено, за счет каких процессов достигается указанный эффект. Также не обозначены пределы применимости данной схемы для различных типов сплавов. 2. При разработке математической модели процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки круглого сечения в закрытых ящичных калибрах получены расчетные зависимости и рекомендации по выбору технологических параметров. Вместе с тем в автореферате не показано, какие физические эффекты учтены в модели впервые и как именно из модели следуют полученные рекомендации. Это затрудняет оценку новизны разработанной модели и её потенциала для дальнейшей оптимизации процесса. 3. В автореферате заявлено об установлении закономерностей формоизменения металла, распределения температуры, скоростей течения и напряжений по длине очага деформации. Эти закономерности представлены в виде безразмерных параметров и графических зависимостей для исследованных сплавов 01417, Al-1%РЗМ, 01570 и 1580. Однако не обсуждаются границы применимости полученных результатов и возможность их распространения на другие классы сплавов без дополнительной калибровки.

2. ФГБОУ ВО «СибГИУ» (г. Новокузнецк), подписанный доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Обработка металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК» Фастыковским Андреем Ростиславовичем. Замечания: 1. Из автореферата не совсем понятно с какой целью изучался процесс прокатки-прессования с одним приводным валком, заведомо уступающий по возможностям процессу с двумя приводными валками. Как следует из текста автореферата стр.13 «реализуемость процесса СПП с одним приводным валком на 20% ниже чем с двумя приводными». 2. Не все параметры, входящие в формулу 10 на стр. 22, расшифрованы.

3. ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (г. Челябинск), подписанный доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением» Чаплыгиным Борисом Александровичем. Замечания: 1. Из текста автореферата следует, что реализуемость процесса СПП с одним приводным валком на 20% меньше, чем с двумя приводными валками. Не совсем понятно для чего проводилось данное исследование? 2. В автореферате не представлена информация о

дальнейшей обработке тонкой электротехнической проволоки, так как она на данном этапе не является конечным продуктом, а только полуфабрикатом.

4. ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» (г. Иркутск), подписанный доктором технических наук, профессором, профессором кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий Зайдесом Семеном Азиковичем. Замечания: 1. При производстве алюминиевой проволоки обработкой металлов давлением в условиях повышенных температур могут образовываться дефекты в виде «оксидных полос», оказывающих влияние на качество готовой продукции. Однако в автореферате этот вопрос не рассмотрен. 2. Автор отмечает, что трение в зоне деформации оказывает важное влияние на устойчивость процесса СПП. В тоже время вопросы трения в зоне контакта матрицы с валками не исследованы и не отражены в автореферате. 3. В диссертации большой объем исследований посвящен механическим свойствам проволоки, но источник их формирования – очаг деформации в исследовании не рассматривался. Отсутствуют результаты по напряженно-деформированному состоянию в очагах деформации и остаточные напряжения в готовой продукции.

5. ФГБОУ ВО «ЛГТУ» (г. Липецк), подписанный доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Обработка металлов давлением» Бельским Сергеем Михайловичем и кандидатом технических наук, доцентом кафедры «Обработка металлов давлением» Шопиным Иваном Ивановичем. Замечания: 1. Стр. 12 автореферата. Смущает величина 0,58 для показателя трения по Зибелю. Напряжение трения по Зибелю $\tau = \psi \sigma_s$, где $\psi = 0.2-1.0$ - показатель трения. С другой стороны $\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} = 0,58\sigma_s$. Условие $\tau = \tau_s$ или $\psi = 1,0$ соответствует трению при экструзии прутка сквозь отверстие матрицы. Как объяснить величину $\psi = 0.9$ для валков и $\psi = 0.58$ для матрицы? Нет ли здесь некоей путаницы в законах трения? 2. Стр. 12 автореферата. Выражение для коэффициента реализуемости процесса СПП $K_y = \frac{P_1 - P_2 \cdot \lambda}{P_1} \cdot 100\%$, произошло от сравнения мощности, подводимой валками к очагу деформации, и мощности, необходимой для осуществления экструзии прутка. Но мощность — это произведение силы и скорости; сократив числитель и знаменатель на скорость, получили силы и коэффициент λ . Но подводится и затрачивается мощность, а не сила. Отсюда путаница в

терминологии. 3. Стр. 13. Что имеет в виду автор, говоря о нетехнологичности получения квадратных заготовок в электромагнитном кристаллизаторе. Перемешивать металл в кристаллизаторе можно как поперечным, так и продольным электромагнитным полем. 4. Стр. 28, 31. Какая точность прибора «Виток»? Судя по таблицам 4 и 7, не менее 0.1% - эта величина реальна?. 5. За таблицей 4 сразу следует таблица 7.

6. АО «РУСАЛ Менеджмент» (г. Красноярск), подписанный кандидатом технических наук, директором департамента качества и технологии Клейменовым Юрием Андреевичем. Замечания: В тексте автореферата не указано, почему для исследований выбран сплав 01570 с повышенным содержанием скандия. Сплав 01570 значительно дороже сплава 1580 при схожих составах и свойствах.

7. ООО «Ступинский Торговый дом» (г. Москва), подписанный кандидатом технических наук, руководителем направления, академическим советником СО РИА, Мотковым Михаилом Георгиевичем. Замечания: 1. В автореферате обозначена достаточная степень деформации 50% при прокатке квадратной заготовки, в то время как для круглой заготовки данный параметр не приведен. 2. Как видится дальнейшее развитие данного направления обработки металлов давлением с применением совмещенных методов?

8. ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (г. Самара), подписанный доктором технических наук, профессором, академиком РАН, научным руководителем НИЛ-37 Гречниковым Федором Васильевичем. Замечания: 1. В качестве замечаний следует отметить, что в автореферате не представлен объем партии проволоки, полученной в ходе промышленной апробации, а также приведена микроструктура только для сплава 01417, в то время как в работе исследованы ещё три сплава.

9. ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (г. Тула), подписанный доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Механика и процессы пластического формоизменения» Черняевым Алексеем Владимировичем. Замечания: 1. В описании Главы 2 (стр. 12 а/р) указано, что «Для уточнения реологической модели при помощи механических испытаний были получены данные о свойствах сплава 01417». При этом не указано, какая модель была принята за основу, насколько

повышена ее точность, в каких температурно-скоростных интервалах, сама модель также не представлена. 2. Автором «получены регрессионные зависимости реологических свойств для четырех исследуемых сплавов системы Al-PZM» (вывод 3). Однако в тексте автореферата указанные уравнения регрессии не приведены. 3. В разделе «Теоретическая и практическая значимость работы» (п.9) заявлено, что применение разработанных технических и технологических решений «позволяет снизить трудо- и энергоемкость, повысить производительность процесса непрерывной прокатки- прессования и качество получаемых профилей». При этом в выводах по работе дана количественная оценка лишь снижению энергозатрат. Остальные заявленные показатели не отмечены.

10. ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (г. Москва), подписанный доктором технических наук, профессором кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Шаталовым Романом Львовичем. Замечания: 1. Недостаточно обоснованы коэффициенты контактного трения и не приведены рекомендации по применению технологических смазок при прокатке и волочении. 2. Из текста автореферата непонятно, по какой методике проводился замер электрического сопротивления проволоки и указан только прибор «Виток».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их значительным научно-практическим опытом, высокой квалификацией и известностью благодаря научным и практическим достижениям в области обработки металлов давлением, в том числе процессов прокатки, прессования и волочения, повышения эффективности и экономичности работы прокатных станов, исследований энергосиловых параметров прокатки, оптимизации напряженно-деформированного состояния, структурно-фазового управления свойствами металлических материалов, разработки новых технологий пластической обработки, а также наличием работ, касающихся темы диссертации, и посвященных исследованиям деформационного поведения и анализу температурно-деформационных условий прокатки алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Sc, поэтапной оценке технологичности и физико-механических свойств длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов электротехнического назначения, компьютерному моделированию процессов

прокатки изделий из сплавов цветных металлов, опубликованных в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. Это подтверждает их способность квалифицированно определить и оценить научную новизну, теоретическую и практическую значимость исследований.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана и теоретически обоснована научная концепция процессов деформации 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;

предложен оригинальный подход к осуществлению деформации прутков с помощью прокатки и прессования в одном очаге деформации. В основе указанного подхода положен принцип создания специальных схем напряженно-деформированного состояния, совмещающих сжатие и сдвиг, что обеспечивает высокие пластические свойства прутка под последующее волочение и снижает количество промежуточных отжигов для получения проволоки из сплавов системы Al-Ce-La до диаметра 0,3 мм и проволоки до диаметра 3 мм из сплавов системы Al-Mg-Sc;

доказана и экспериментально подтверждена перспективность и целесообразность использования методов совмещенной прокатки-прессования и бесслитковой прокатки-прессования для получения прутков, обладающей достаточной пластичностью для последующего получения электротехнической проволоки из сплава 01417, соответствующей требованиям ТУ 1-809-1038-2018, а также сварочной проволоки из сплавов 1580 и 01570. Данная проволока использовалась для сварки модельных образцов. Сварные образцы прошли необходимые испытания, продемонстрировав следующие результаты: падение прочности сварного шва не превысило 10% от нормативного показателя для алюминиевых сплавов в

состоянии отжига, установленного ОСТ 92-1114-80, что соответствует сварным швам первой категории;

введено новое понятие – «коэффициент реализуемости процесса совмещенной прокатки-прессования при прокатке круглой заготовки в закрытых ящичных калибрах». Деформация круглых заготовок в прямоугольном калибре существенно отличается от деформации квадратных заготовок. Требуемое 50% обжатие для стабильного процесса СПП прямоугольных заготовок применимо только при полном заполнении калибра, что не выполняется для круглых заготовок. Для круглых заготовок рекомендуется увеличение ширины канавки калибра на 5-15% от диаметра.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

доказаны положения, расширяющие существующие представления о возможностях преодоления технологических ограничений (по деформации, усилиям, механическим свойствам, количеству промежуточных отжигов, выходу годного и энергозатратам) классических способов ОМД, таких как прокатка и прессование. Расширены границы применимости полученных результатов, а именно использование разработанных моделей дало возможность получить новые научные данные, в том числе по параметрам термомодеформационной обработки при использовании заготовки круглого поперечного сечения для исследуемых сплавов, основными из которых являются следующие: температура обработки 480-550 °С; температура инструмента 100-200 °С; обжатие при прокатке не менее 50%; вытяжка при прессовании в диапазоне 6,5-15,3;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы: статистический анализ, математическое моделирование, комплекс существующих базовых методов исследования, в том числе численных методов конечных элементов, а также экспериментальных методик исследования процессов совмещенной прокатки-прессования, в том числе с применением уникальной научной установки, новая 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-PZM;

изложены факторы и условия, обеспечивающие создание за 1 проход при совмещенной прокатке-прессовании значительных сдвиговых деформаций, соизмеримых с процессами интенсивной пластической деформации и получении механических и электрофизических свойств, недостижимых для традиционных методов прокатки и прессования;

раскрыты проблемы, связанные с глубокой переработкой сплавов системы Al-PЗМ в зависимости от ряда факторов, таких как величины деформации, усилия, температурно-скоростных параметров, геометрии инструмента с определением степени влияния каждого из них; технологические параметры, влияющие на конечные свойства длинномерных деформированных полуфабрикатов; обоснованность применения новых 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 труднодеформируемых алюминиевых сплавов с высоким уровнем механических свойств;

изучены 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-PЗМ, а также закономерности изменения механических свойств изделий из сплавов алюминия системы Al-PЗМ, полученных методами СПП и БПП с последующим волочением и термообработкой;

проведена модернизация существующих математических моделей, описывающих деформированное состояние металла, энергосиловые параметры процессов совмещенной прокатки-прессования и бесслитковой прокатки-прессования, в том числе во взаимосвязи с получаемой микроструктурой и механическими свойствами сплавов системы Al-PЗМ.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены алгоритм проектирования совмещенных процессов прокатки-прессования с последующим волочением и термической обработкой прутков и проволоки из сплавов системы Al-PЗМ и

компьютерные модели процессов СПП, пригодные для анализа формоизменения, энергосиловых и температурно-скоростных параметров процессов совмещенной обработки сплавов системы Al-PЗМ;

определены области практического использования результатов работы и рациональные деформационные режимы бесслитковой прокатки-прессования при изготовлении сварочной проволоки из сплавов системы Al-Mg с различным содержанием скандия и рациональные деформационные режимы совмещенной прокатки-прессования при использовании круглой заготовки для изготовления электротехнической проволоки из сплавов системы Al-Ce-La. при получении деформированных и сварных полуфабрикатов при суммарной степени холодной деформации до 80 %, температуре 350 °С 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. Для сплава 01417 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 °С;

создана комплексная ресурсосберегающая технология для производства проволоки из сплавов системы Al-PЗМ с применением совмещенных методов обработки, позволяющих снизить энергоемкость на 30-50% и увеличить выход годного металла на 18-20% по сравнению с традиционной технологией прямого горячего прессования;

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию технологий совмещенной прокатки-прессования, а именно комплекс новых технологических решений, обеспечивающих снижение энергоемкости на 30-50%, измельчение зерна микроструктуры, повышение технологической пластичности и исключение дополнительных операций промежуточного отжига при волочении проволоки из сплавов системы Al-PЗМ. Техническая новизна подтверждена 6 патентами на изобретения РФ №2457914, №2570684, № 2689460, №2724758, №2792327, №2847204).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

эксперименты проведены с использованием современных средств физического моделирования термомеханических процессов обработки металлов давлением, металлографического анализа, а также испытаний механических свойств. Экспериментальные исследования процесса совмещенной прокатки-прессования выполнены с применением установок СПП-200 и СЛиПП-2,5 в лаборатории совмещенного литья-прокатки-прессования института цветных металлов ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», и с применением установки СПП-400 на ООО «Завод современных материалов»;

теория диссертационного исследования базируется на уравнениях и законах теории пластичности, теории обработки металлов давлением, реологических моделях материалов, уравнениях энергетического баланса, результатах конечно-элементного моделирования в специализированной программе Deform 3D и согласуется с опубликованными экспериментальными данными;

идеи базируются на результатах анализа и обобщения передового отечественного и зарубежного опыта применения совмещенных методов обработки для получения прутков под последующее волочение, для уменьшения размера зерна и повышения за счет этого механических и электрофизических свойств различных металлов и сплавов, описанные в трудах Б. Авитцура, В.Л. Бережного, А.И. Батурина, Н.А. Белова, С.В. Беляева, А.А. Богатова, В.Н. Выдрина, М.С. Гильденгорна, Э. Германа, Ю.В. Горохова, Д. Грина, Р. Гржиба, Г.С. Гуна, Н.Н. Довженко, А.В. Зиновьева, А.Г. Колесникова, В.Н. Корнилова, Ю.Н. Логинова, И.П. Мазура, А.М. Песина, И.Н. Потапова, В.К. Смирнова, Л.Г. Степанского, А.И. Целикова, С.Н. Черняка, В.Н. Шеркунова, В.Н. Щербь и др., и не противоречат результатам, представленным в независимых источниках;

использованы сравнения полученных автором данных о формировании микроструктуры, механических и электрофизических свойств сплавов системы Al-PZM при совмещенной прокатке-прессовании и бесслитковой прокатке-прессовании с ранее полученными результатами экспериментальных исследований других авторов;

установлен высокий уровень сходимости результатов моделирования, выполненных автором, лабораторных и промышленных испытаний,

позволяющих достичь наилучших параметров микроструктуры проволоки, а также комплекса его прочностных, пластических и электрофизических свойств, с известными теоретическими и экспериментальными данными и научными представлениями;

использованы современные методики сбора и обработки исходной информации с применением компьютерных технологий и современного программного обеспечения, измерительные приборы (месдозы, термопары) и пакеты прикладных программ (Deform 3D, MathCAD, AutoCAD, PROVOL, MS Excel), обширный литературный материал, а также симулятор термомеханических процессов Gleeble 3800 для исследования деформационного поведения сплавов системы Al-Mg-Sc.

Личный вклад соискателя состоит в формулировке цели и задач исследования; создании методологических и теоретических основ процессов совмещенной прокатки-прессования и бесслитковой прокатки-прессования; разработке методик исследований и научных основ процесса совмещенной прокатки-прессования заготовки прямоугольного поперечного сечения в закрытых ящичных калибрах; создании математических моделей и моделировании с их помощью совмещенных процессов в Deform 3D; проведении экспериментов в лабораторных и промышленных условиях; разработке новых технических решений по конструкциям и способам совмещенной обработки; анализе, обобщении результатов исследований и формулировке выводов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

В отзыве ведущей организации:

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 совмещенной 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.

В отзыве официального оппонента Колесникова А.Г.:

1. Формулировка цели исследований точнее могла бы быть в следующей редакции: "Экономия энергоресурсов, повышение производительности и выхода годного металла при производстве проволоки малых сечений из сплавов системы Al-РЗМ".

2. В работе в литературном обзоре указана производительность совмещенных процессов, но не указана производительность установок СПП-200, СПП400 и СЛИПП-2,5. Также непонятно, что обозначают цифры в названии установок. Это размеры узлов или производительность?

3. Низкое качество и мелкий шрифт на рис. 2.7-2.9 (стр. 54-56 диссертации) затрудняет анализ данных.

4. В табл. 3.1 (стр. 87) в химическом составе в качестве легирующих элементов указаны церий, лантан и празеодим в количестве 7 - 9%. Какой элемент был преобладающим? Контролировался ли химический состав сплава?

5. В главах 3-5 представлены два совмещенных метода получения прутков из сплавов системы Al-Ce-La: СПП и БПП. Оба способа позволяют получить проволоку из представленных сплавов, но не совсем понятно, какой из этих двух способов лучше и экономичнее.

6. В работе в Приложении (стр. 274) указан ожидаемый экономический эффект при получении прутка диаметром 9 мм. Однако для сплава 01417 в качестве финальной продукции наибольший интерес представляет тонкая проволока, полученная из прутка диаметром 9 мм. Какая стоимость у конечной проволоки из сплава 01417? 7. В работе указаны диаметры 0,3 и 0,5 мм для проволоки из сплава 01417, но не упоминается, какой диаметр проволоки из сплава 01417 является конечным по требованиям потребителя.

В отзыве официального оппонента Шварца Д.Л.:

1. Раздел 2.2 представлен не убедительно и несколько небрежно. Выражения 2.12 и 2.13 не соответствуют тексту, предшествующему им. Следующие за ними предложения вырваны из контекста. В таблице 2.1 также имеются неточности, например, «Размеры калибра в наименьшем сечении $h \times b$, мм» для СПП-200 составляют «3». В заголовке заявлены «Теоретические исследования геометрических параметров очага деформации», однако, как таковые, геометрические параметры очага деформации не описаны.

2. При постановке задачи математического моделирования процесса совмещенной прокатки-прессования, выражения 2.17 и 2.18 описывают изменения высоты их деформируемого металла. Однако, в указанных выражениях отсутствует зависимость высоты и от координаты x . И в целом, при заданных радиусах валков и размерах исходной заготовки по выражениям 2.17 и 2.18 высоты h_x - есть величина постоянная.

3. Как при постановке вариационной задачи учитывалось, что исходная заготовка круглого поперечного сечения?

4. При постановке вариационной задачи принято допущение об отсутствии уширения. Скорость скольжения и напряжения трения в зонах 1 и

2 (см. рис. 2.18) лежат в касательной плоскости к поверхности вала (кинематическое граничное условие на поверхности скольжения). В предположении, что $V_y = 0$ (отсутствие уширения), они тождественно лежат на линии касательной к окружности вала. О каких проекциях идет речь в выражении 2.44?

5. Осталось не совсем ясным, как определялись реологические свойства сплава 01417 на установке СПП-200 методом кручения (стр. 87)?

6. При исследовании реологических свойств сплава 1580 заявлено, что: «Получены формулы, описывающие напряжения текучести в установившемся режиме. Эти формулы выражаются через параметр Зинера-Холломона и позволяют точно предсказывать сопротивление сплава пластической деформации.» (стр. 184). Однако указанные формулы в диссертации не приведены.

7. В разделе 7.1 описаны установки (см. рис. 7.2 и 7.3) и способ непрерывного процесса прокатки прессования. В чем заключается непрерывность предложенного способа?

8. Автореферате не приведены результаты металлографических исследований, которых в тексте диссертации достаточно много. Почему?

В отзыве официального оппонента Уманского А.А.:

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 валка». 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 валка 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-РЗМ. 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 размер 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 РЗМ, а также распределение месторождений РЗМ 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.

От членов диссертационного совета:

1. Скажите, пожалуйста, Ваша работа посвящена деформированию алюминиевых сплавов. Что их кардинально отличает от сталей, зачем понадобилось создание данных процессов? Хотелось бы выяснить, эти сплавы обладают какими-то специфическими свойствами, что по-другому их деформировать нельзя?

2. Всем известны достижения красноярской школы – разработка совмещенных процессов прокатки и прессования. С точки зрения

теоретической части, что отличает Вашу теорию от разработанных теоретических научных основ Ваших предшественников?

3. У Вас в работе указано энергосбережение, т.е. данные процессы направлены на снижение энергозатрат и улучшение некоторых показателей качества проволоки различного назначения и мало сказано о достижении физико-механических свойств, как это сказано в П. 7 научной новизны: «...позволило достичь требуемого комплекса свойств». До Ваших разработок это достигалось?

4. Так как проволока из сплава 01417 изначально была разработана с применением гранульной технологии, в автореферате указано, что проволока термостойкая. Есть ли требования нормативных документов к продукции, произведенной по гранульной технологии? Можно ли сравнить свойства проволоки, полученной Вашим способом со свойствами проволоки изготовленной по гранульной технологии?

5. Приведены ли в работе значения по уровню термостойкости проволоки, полученной Вашим способом?

6. В автореферате после Таблицы №4 идет Таблица №7. Пропущены номера 5 и 6.

7. Для чего нужно было осуществлять процесс СПП с одним приводным валком, и оценивались ли недостатки данного способа?

8. Оценивалась ли энергоэффективность в денежном выражении и в сравнении с классическими способами производства аналогичной продукции?

9. Подвергается ли дальнейшему волочению полученный пруток?

10. Сильно ли зависит сопротивление деформации от скорости осуществления процесса СПП?

11. В чем особенность деформационного поведения сплавов системы Al-PZM? Чем эти сплавы отличаются, например, от титановых сплавов?

12. По слайду №19. В чем заключается принцип работы электромагнитного кристаллизатора?

13. В автореферате есть понятия электромагнитного перемешивания и турбулентного перемешивания. Чем отличаются эти два термина?

14. Традиционный способ получения сварочной проволоки – это прокатка в круг, а затем волочение. Подскажите, пожалуйста, чем прессование лучше волочения?

Соискатель Ворошилов Денис Сергеевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

На сегодняшний день возникла потребность в экономичных установках совмещенной обработки, в том числе и непрерывных, которые позволяют получать как большие объемы продукции в виде прутков и катанки, так и осуществлять плавный переход с одного сплава на другой при небольших партиях заказов. Промышленные установки Конформ требуют электродвигателя мощностью 300-400 кВт, а у способа Экстроллинг матрица плотно примыкает валкам по линии их оси, что уменьшает активные силы трения и ограничивает количество обрабатываемых сплавов. На крупных современных агрегатах это трудноосуществимо. Более экономичным решением является способ бесслитковой прокатки-прессования (БПП), т.к. исключает передел в виде получения твердой заготовки. Применение того или иного способа зависит от требований к свойствам конечной продукции. Для электротехнической проволоки из сплава 01417, чтобы уложиться в требования нормативных документов, необходима заготовка из ЭМК и метод совмещенной прокатки-прессования (СПП). Если же нет требований по структуре, то целесообразнее применять способ БПП. Максимальная производительность установки СПП-200 составляет 1,6 т/ч, а для СлиПП-2,5 – 2,5 т/ч. Что касается самих сплавов, то сплав 01417, который содержит Се, La, Pr от 7 до 9%, используется в качестве бортовой проводки летательных аппаратов и должен сохранять свои свойства до 200°C. Это было сделано взамен медных сплавов, которые нагревались и провисали под действием гравитации. Что касается сварочной проволоки сплавов системы Al-Mg-Sc, то объемы потребления сварочной проволоки в России составляют 150 тыс. т/год по данным 2025 года, а также ранее нехватка такой проволоки компенсировалась поставками из-за рубежа. Сплав 01417 ранее пытались деформировать и обычным прессованием, а также с помощью гранульной технологии, включающей 17 технологических переделов, чтобы достичь требуемого уровня свойств. Классическими способами можно уложиться в прочностные и пластические свойства проволоки, но существует вероятность

не пройти по значениям электросопротивления. Пластичность важна на начальном этапе при волочении прутка, а в конце требуется сбалансированный комплекс свойств, которые являются взаимоисключающими, а совмещенные процессы позволили достичь этого комплекса свойств. Передаваемая валками мощность активных сил трения, должна равняться или превышать мощность, необходимую для деформации металла, даже с одним приводным валком этой мощности было достаточно, хоть и процесс с одним приводным валком при определенных условиях может быть сложнее реализуем. Процесс СПП с одним приводным валком изучался как менее энергозатратный, хоть и реализуемость на 20% меньше, что вполне достаточно для более пластичных сплавов. Эффект наплыва металла со стороны приводного валка наблюдается на начальной стадии процесса СПП и исчезает при установившейся стадии. Были учтены реологические свойства и геометрические параметры процесса СПП, в том числе приведенные параметры. Определялась зависимость сопротивления сдвига от температуры от 0 до 550°C, скорости деформации от 0,5 до 10 с⁻¹ и степени деформации на установке кручения. Наиболее влияет на свойства температура, а скорость деформации в меньшей степени. Коэффициент теплообмена составлял 11 Вт/(м²×°C), температура инструмента и окружающей среды 25°C, теплопроводность и теплоемкость автоматически выставлялись из базы данных. Без дополнительной калибровки возможна деформация более мягких алюминиевых сплавов. В начальной стадии процесса СПП происходит трение стали по стали, но постепенно происходит покрытие калибра тонким слоем обрабатываемого сплава, поэтому происходит уже трение стальной матрицы о покрытый алюминием калибр. Поэтому для проведения компьютерного моделирования использовался показатель трения по Зибелю 0,58 на матрице и 0,9 на валках. Произвести тончайшую алюминиевую проволоку с РЗМ до диаметра 0,14-0,30 мм с заданными свойствами позволяет только применение круглой заготовки, полученной в электромагнитном кристаллизаторе (ЭМК). Принцип работы ЭМК в том, что в расплаве создаются вихревые токи, которые равномерно перемешивают частицы по объему заготовки. За счет небольшого диаметра заготовки достигаются высокие скорости охлаждения. За счет давления воды и электромагнитного поля получаемая заготовка не касается стенок

кристаллизатора. Таким образом, достигается высокое качество поверхности и получается ультрамелкозернистая структура заготовки. Поэтому получается уникальный сбалансированный уровень свойств, позволяющий даже при высокой прочности заготовки с использованием совмещенных методов получить заготовку под волочение с высокой пластичностью и достичь требуемых свойств у проволоки. С применением вариационных методов была создана математическая модель деформации круглой заготовки в закрытых ящичных калибрах, а также квадратных по сечению заготовок с одним и двумя приводными валками. Разработанная технология универсальна – как для квадратных заготовок, так и для круглых, что исследовано впервые. Для определения высоты (диаметра) заготовки круглого поперечного сечения на входе для стабильной прокатки и заполнения калибра определяют, как равенство поперечного сечения калибра и площади заготовки, чтобы выполнялось условие реализуемости: экспериментальное значение высоты гребня вала, заложенное в конструкции установки совмещенной обработки больше или равно высоте гребня вала с выступом. Рекомендуемое значение обжатия при прокатке для круглой заготовки составляет 70%. Далее полученный после СПП пруток подвергался волочению с промежуточными отжигами. Конечный диаметр полученной проволоки составлял 0,3 и 0,5 мм. Замеры электросопротивления у полученной проволоки проводились на образцах длиной 1 м с помощью омметра «Виток» по ГОСТ 7229-76: 6 ч выдержки в помещении и 6 интервальных замеров с поправочным коэффициентом на температуру окружающей среды. После СПП и волочения полученная проволока подвергается процессу серебрения перед установкой в узлы летательных аппаратов. Полученную проволоку из сплава 01417 испытывали в сертифицированной лаборатории. Она должна была сохранить свои свойства при 200°C. Данные значения были достигнуты, что подтверждается актами промышленного внедрения результатов исследований.

На заседании 02.06.2026 диссертационный совет принял решение за решение научной проблемы, связанной с разработкой теоретических и технологических основ эффективного производства совмещенными методами обработки металлов давлением изделий и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, легированных редкоземельными металлами,

