

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.479.14,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И
ТЕХНОЛОГИЙ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета от 26.12.2025 г. № 19

О присуждении Жуковой Ольге Олеговне, гражданину РФ, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Механические свойства, электропроводность и термостойкость наноструктурированных сплавов системы Al-Fe для использования в электротехнике» по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы принята к защите 16.09.2025 г., протокол № 12, диссертационным советом 24.2.479.14, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32, созданного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1977/нк от 18.10.2023 г.

Соискатель **Жукова Ольга Олеговна**, 15.08.1996 года рождения, в 2018 году окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» по направлению подготовки 22.03.01 - Материаловедение и технологии материалов с присвоением квалификации бакалавр, в 2020 году окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» по направлению подготовки 22.04.01 - Материаловедение и технологии материалов с присвоением квалификации магистр. В 2024 году окончила аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по направлению подготовки 22.06.01 - Технологии материалов с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

Работает в должности инженера-исследователя научно-исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре материаловедения и физики металлов института технологий и материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат технических наук Мурашкин Максим Юрьевич, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Официальные оппоненты:

Бродова Ирина Григорьевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории цветных сплавов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук;

Маркушев Михаил Вячеславович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией «Материаловедение и технологии легких сплавов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (ИПСМ РАН),

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), г. Белгород, в своем положительном отзыве, подписанном Федосеевой Александрой Эдуардовной д.т.н., доцентом кафедры материаловедения и нанотехнологий и Пановым Дмитрием Олеговичем к.т.н., доцентом кафедры материаловедения и нанотехнологий, указали, что «В целом, по научному уровню полученных результатов, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа Жуковой О.О. соответствует критериям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденных Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. Постановления Правительства РФ от 25.01.2024 г. № 62), а её автор, Жукова Ольга Олеговна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.6 Нанотехнологии и наноматериалы».

Соискатель имеет 19 научных работ, из них 3 работы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 4 работы входят в международные базы цитирования Web of Science и/или Scopus, 11 публикаций в сборниках трудов конференций и 1 патент РФ. Общий объем публикаций – 4,4 п.л., авторский вклад – 1,2 п.л. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации; соискатель ссылается на авторов и источники заимствования.

Наиболее значимые работы: 1. Медведев А.Е., Жукова О.О., Федотова Д.Д., Мурашкин М.Ю. Механические свойства, электропроводность и термостабильность проволоки из сплавов системы Al-Fe, полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор / Frontier Materials & Technologies. – 2022. – № 3-1. – С. 96-105. В работе представлены результаты исследования микроструктуры и физико-механических свойств проволоки из сплавов Al-0,5Fe и Al-1,7Fe (вес. %), полученных непрерывным литьем в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). Проведен

сравнительный анализ свойств исследованных сплавов с коммерческими сплавами. 2. Medvedev A.E., Zhukova O., Kazykhanov V., Shaykhulova A., Enikeev N., Timofeev V., Murashkin M. On the effect of ECAP and subsequent cold rolling on the microstructure and properties of electromagnetically cast Al-Fe alloys / *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. – 2022. – Vol. 5. № 4. – P. 484-495. В работе впервые исследованы высокочистые бинарные сплавы Al-0,5Fe и Al-2,5Fe (вес.%), полученных методом сверхбыстрой кристаллизации с помощью электромагнитного литья и подвергнутых комбинированному воздействию равноканального углового прессования и холодной прокатки. 3. Medvedev A., Zhukova O., Enikeev N., Kazykhanov V., Timofeev V., & Murashkin M. The effect of casting technique and severe straining on the microstructure, electrical conductivity, mechanical properties and thermal stability of the Al-1,7 wt.% Fe alloy / *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – № 8. – P. 1-14. В работе рассмотрены изменения микроструктуры и свойств сплава Al-Fe, полученного литьем с различной скоростью кристаллизации с последующей интенсивной пластической деформацией и прокаткой. В частности, исследованы различные состояния литого сплава Al-1,7 вес.% Fe, полученного традиционным литьем в графитовую форму и непрерывным литьем в электромагнитный кристаллизатор, а также после равноканального углового прессования и последующей холодной прокаткой. 4. Medvedev A.E., Zhukova O.O., Shaikhulova A.F., Murashkin M.Yu. The influence of Cu additions on the microstructure and properties of Al-Fe system alloys produced by casting into electromagnetic crystallizer / *Frontier Materials & Technologies*. – 2024. – № 2. – P. 77–85. В работе исследовано влияние малых (до 0,3 вес. %) добавок меди на микроструктуру и физико-механические свойства, а также фазовые трансформации в сплавах системы Al-Fe с содержанием железа 0,5 и 1,7 вес. %, полученных методом непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор. Во всех состояниях были изучены микроструктура (с помощью РЭМ), предел текучести, предел прочности при растяжении, удлинение до разрушения и электропроводность.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород. Отзыв положительный. Замечания: 1) Когда речь идет о внедрении недорогостоящих сплавов желательно произвести экономический расчет себестоимости по химическому составу, а также отсюда вытекает и технологичность готового продукта, насколько экономически целесообразно проводить столь сложные схемы деформационных обработок по сравнению с уже применяемыми материалами? 2) Чем обусловлено ограничение до 2,5% содержания железа в сплаве и почему добавляется только 0,3% меди? Чем в выводе 4 обосновано рациональное содержание железа от 1,0 до 2,2 вес.%, поскольку указанные концентрации не были исследованы в работе? 3) Требуется ли для этих сплавов как материалов, применяемых в электротехнике, рассмотреть устойчивость к контактной коррозии гальванических пар? 4) Как поведет себя сформированная структура после непрерывного литья в ЭМК с последующей двухэтапной ДО алюминиевого сплава при необходимых в электротехнике технологических операциях горячей и холодной сварки, пайки, не снизятся ли электропроводность и

другие физико-механические свойства проводника? 5) Можно ли на основе полученных данных выделить оптимальный режим получения и обработки алюминиевых сплавов Al-Fe? Соответствует ли требованиям проводниковых материалов (15% и др. значения) достигнутый уровень прочностных и пластических свойств сплавов системы Al-Fe после различных деформационных обработок? 6) Как была измерена плотность дислокаций? 7) Что имеется в виду под термической стабильностью микроструктуры? В работе не были представлены сведения о времени выдержки при различных температурах отжига для оценки стабильности микроструктуры? 8) За счет чего наблюдается увеличение прочностных характеристик Al-Fe сплавов, дополнительно легированных медью? Только ли за счет измельчения частиц вторых фаз? Как медь влияет на размер частиц? Меняется ли их объемная доля?

2. Официального оппонента Бродовой И.Г., д.т.н., профессора, главного научного сотрудника лаборатории цветных сплавов ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Замечания: 1) Вывод автора, что литье в ЭМК вызывает измельчение структуры слитков за счет роста скорости охлаждения расплава до 10^3 K/c необходимо уточнить, что речь идет о структурообразовании слитков малого сечения. Именно из-за размера слитков реализуются высокие скорости кристаллизации, а использование ЭМК обеспечивает интенсивное перемешивание расплава, однородность химического состава и отсутствие неметаллических включений. 2) На стр. 59 (глава 3) утверждается, что при невысокой скорости охлаждения расплава (10-20 K/c) в слитках образуется метастабильная фаза Al_6Fe , однако, это не согласуется с известными литературными данными, согласно которым замена стабильной эвтектики ($Al+Al_3Fe$) на метастабильную эвтектику ($Al+Al_6Fe$) происходит при высоких скоростях кристаллизации (например, в гранулах). 3) В качестве доказательств замены фазы Al_6Fe на фазу Al_2Fe при литье в ЭМК автор приводит результаты РСА, предлагая сравнить участки дифрактограмм на рис. 3.5 и рис. 4.3 в диапазоне углов $38-46^\circ$, где обе фазы имеют близкие значения межплоскостных расстояний. Для более корректной идентификации фазы Al_2Fe требуется иллюстрация участка дифрактограммы в диапазоне меньших углов (например, $24-32^\circ$), где нет интенсивных линий фазы Al_6Fe .

4) Согласно результатам главы 5, формирование более мелкой структуры литого тройного сплава обусловлено медью, т.е. растворяясь в Al твердом растворе, она затрудняет рост и миграцию зерен. Возникает вопрос. Почему, несмотря на наличие наноразмерных интерметаллидов по границам мелких зерен, тройной сплав обладает более низкой термической устойчивостью по сравнению с двойным сплавом Al-0,5%Fe. 5) В заключении (вывод 4) указан интервал рационального содержания Fe от 1.0 до 2.2%. Необходимо объяснить, чем обусловлен выбор верхнего предела концентрации Fe в проводниках, полученных по технологии с применением ИПД. 6) Все представленные в диссертации дифрактограммы и микроэлектронограммы не расшифрованы, кроме того, не указано, в каких рефлексах фазы Al_2Fe сняты темнопольные изображения. 7) Несмотря на грамотное оформление текста диссертации, обнаружены опечатки и неточности. Например, в выводах фаза Al_6Fe

указана как стабильная, а на стр. 138 эвтектическая фаза – как вторичная и т.д. В связи с тем, что экспериментальные главы построены по одному алгоритму: структура, структура после РКУП+ХП, физико-механические свойства, термическая стабильность, в тексте диссертации много повторяющихся абзацев.

3. Официального оппонента Маркушева М.В., д.т.н, главного научного сотрудника, заведующего лабораторией «Материаловедение и технологии легких сплавов» ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, г.Уфа. Замечания: 1) Не смотря на большой список процитированных первоисточников, обзор литературы, по сути, больше информативный (справочный), чем аналитический, что требуется для диссертационной работы. Кроме того, в нем в недостаточной мере рассмотрены как технологические аспекты процессов, использованных в работе, так и природа и феноменология трансформации структуры алюминиевых сплавов при деформационных и термических воздействиях, в особенности при холодной ИПД различными методами. 2) Неудачно сформулированы основные положения, выносимые на защиту: теоретическая и практическая значимости и новизна близки по содержанию и форме изложения, много лишних слов. 3) В работе есть ряд терминологических неточностей. Например, из морфологических составляющих, характеризующих структуру матрицы, выделен размер зерна, который упоминается в тексте наряду с «остальной» морфологией. Другой пример. Помимо физико-механических свойств, также отдельно указывается термическая стабильность структуры. 4) Как и в любой диссертации, в работе обнаруживаются неточности, описки и ошибки в оформлении. Например, на стр. 60 записки, при описании изменения свойств в тексте нарушена последовательность ссылок на рисунки 3.6а и 3.6б. На стр. 75, в первом абзаце дважды указан предлог «до». На стр. 82 нарушена последовательность ссылок на рисунки 4.4а и 4.4б. На стр. 110 вместо Таблицы 5.1. следовало указать таблицу 5.2. И ряд других. 5) Одной из основных характеристик структуры исследованных объектов указывается строчечность вторых фаз. Однако автор не раскрыл природу ее формирования, как и не оценил ее параметры, а указал лишь размер и форму ее составляющих - отдельных частиц, что не характеризует строчечность. В работе также не показана роль строчечности в структурировании матрицы и ее гомогенности, и не обсужден эффект строчечности на регистрируемые свойства объектов. 6) Для аттестации структуры матрицы следовало использовать метод SEM-EBSD, который позволил бы более достоверно и информативно охарактеризовать ее линейные и угловые параметры, а также аттестовать субструктуру. Без этих данных оценка вкладов различных упрочняющих вкладов/механизмов в прочность сплавов, по крайней мере, не убедительна. С помощью указанного метода следовало бы также более детально и, что немаловажно, более достоверно провести анализ и представить изменения структуры матрицы сплавов на всех этапах обработки, начиная с литья, и разобраться в действовавших механизмах и особенностях протекания ее полигонизации и рекристаллизации. 7) Недостаточно раскрыты особенности и механизмы структурирования вторых фаз в процессе обработки сплавов. Одна из причин – отсутствие анализа их морфологии во взаимно перпендикулярных плоскостях. Другая – отсутствие необходимой для сравнительного анализа информации о

режимах получения литых заготовок, а также об их термической обработке. Не понятно, выполнялась ли гомогенизация заготовок? Каких именно композиций сплавов? И если да, то каковы были ее режимы, особенно скорость охлаждения, что наиболее критично для сплава с медью? Касаемо частиц, например, автор утверждает, что при РКУП сплава с 1.7%Fe исходно пластинчатые частицы приобретали равноосную форму, а в тексте, видимо ошибочно, сначала указывает, что не претерпевали изменений, а ниже - претерпевали. Исходные размеры указаны как от 300 нм до 10 мкм, а после РКУП - 335 ± 65 нм (видимо толщина) и длина 2500 нм. Вопрос: каков механизм их измельчения и почему измельчение частиц наблюдали только в этом сплаве, а в остальных нет? Какова причина такого поведения? Могла она быть вызвана разницей в качестве литых заготовок? 8) В процессе отжига, автор обнаружил огрубление волокнистой структуры деформированных сплавов за счет роста их толщины и при этом не раскрыл природу этого явления. Хотелось бы услышать мнение автора о движущей силе и механизмах такого роста волокон.

4. Дрица А.М., к.т.н., директора по развитию бизнеса и новых технологий Акционерного Общества «Самарский металлургический завод» (АО «СМЗ»). В отзыве отмечено, что актуальность работы не вызывает сомнения. Она обусловлена значительным научным и практическим интересом к электротехническим сплавам на основе алюминия. Основной целью осуществляемых в настоящее время в России и за рубежом исследований, является создание сплавов, которые позволят расширить область использования продукции из алюминия, в том числе и за счет замещения более дорогих проводников на основе меди. Замечания: 1) В работе вывод о возможность использования полученных проводников из сплавов Al-Fe в качестве замены проводников, получаемых на кабельных предприятиях из серийных сплавов систем Al-Zr, Al-PЗМ, Al-Mg-Si, делается на основании сопоставления механических свойств, электропроводности и термостойкости образцов проволоки. Однако, например, в ГОСТ Р МЭК 62004-2014, в методах проведения испытаний проволоки, также рекомендованы испытания навиванием. При их осуществлении, в определенных условиях, проволока не должна сломаться. Почему не проводили подобных исследований? 2) Автор установил оптимальное содержание железа для сплавов, получаемых по предлагаемой технологии получения проволоки, но из данных автореферата не ясно какое оптимальное содержание меди нужно для этих сплавов.

5. Рааба Г.И., д.т.н., главного научного сотрудника, руководителя лаборатории «Механика градиентных, бимодальных и гетерогенных металлических наноматериалов повышенной прочности и пластичности для перспективных конструкционных применений им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «Магнитогорский Государственный технический университет им. Г.И. Носова». В отзыве отмечено, что достоверность полученных результатов диссертационной работы обеспечивается применением современных сертифицированных аналитических приборов, стандартных методик испытаний, использованием передового технологического и современного исследовательского оборудования в области материаловедения, нанотехнологий и наноматериалов. Замечания: 1) Чем обусловлен выбор содержания

меди (0.3 вес.%) для сплава Al-0,5Fe? 2) Коррозионная стойкость очень важна при длительной эксплуатации неизолированных проводов, например, используемых в ВЛЭП. Как присутствие меди в алюминии скажется на уровне коррозионной стойкости предлагаемого проводникового сплава?

6. Астафуровой Е.Г., д.ф.-м.н., доцента, заведующей лабораторией физики иерархических структур в металлах и сплавах ИФПМ СО РАН; **Майера Г.Г.**, к.ф.-м.н., научного сотрудника лаборатории физики иерархических структур в металлах и сплавах ИФПМ СО РАН. В отзыве отмечено, что автором работы предложен подход к решению научно-технической проблемы и использована технологическая схема, сочетающая в себе метод непрерывного литья в ЭМК, метод равноканального углового прессования (РКУП), прокатку и волочение, с целью повышения физико-механических свойств сплавов системы Al-Fe. В связи с этим, актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений, а ее результаты имеют как научную, так и практическую ценность. Замечания: 1) На рисунке 1в приведено изображение микроструктуры сплава Al-3,4Fe, содержащей интерметаллидные частицы разной морфологии и, возможно, разного состава. Были ли проведены оценки состава таких частиц? 2) Из текста автореферата не ясно, как разделяли вклад от границ зерен и субзерен при оценке вкладов от различных механизмов упрочнения (стр. 16 автореферата).

7. Коновалова С.В., д.т.н., профессора, проректора по научной и инновационной деятельности, заведующего кафедрой механики и машиностроения ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»; **Шуберга А.В.**, младшего научного сотрудника управления научных исследований; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». В отзыве указано, что автореферат характеризуется высокой обоснованностью постановки целей и задач, а также последовательным изложением методологии, экспериментальных исследований и анализа результатов. В ходе работы исследованы методы получения сплавов Al-Fe с различным содержанием железа, влияния медной легирующей добавки, а также режимы деформационной обработки, воздействующие на микроструктуру и свойства материалов. Замечания: 1) В главе 5 (рисунки 11 и 12), посвященном медной добавке, следует подробнее осветить кинетику растворения меди и ее взаимосвязи с фазами Al_2Fe в процессе обработки и термообработки. Такое дополнение сделает обсуждение полным и научно обоснованным. 2) В главах 3 и 4 полезно было бы более широко раскрыть механизмы термостойкости, особенно влияние миграции зернограницных дефектов и сохранение наночастиц Al_2Fe после отжига. Это бы украсило работу и углубило понимание изменений механических свойств.

8. Орловой Т.С., д.ф.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории физики профилированных кристаллов отделения физики твердого тела Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе ФГБУН Российской академии наук. В отзыве отмечено, что диссертационная работа Жуковой О.О. направлена на решение проблемы путем создания наноструктурированных сплавов Al-Fe с использованием перспективных методов обработки, таких как литье в электромагнитный кристаллизатор и интенсивная пластическая деформация, и поэтому, несомненно, является важной и

актуальной. Выбор системы Al-Fe оправдан низкой растворимостью Fe в алюминиевой матрице, а также невысокой стоимостью и доступностью железа как легирующего элемента. Замечания: 1) В выводах указано определенное «рациональное содержание железа» как интервал 1.0-2.2 вес.%. В тексте наиболее подробно приведены исследования составов 0.5%, 1.7%, 2.5%. Желательно было бы кратко пояснить, на основании каких данных (например, оптимизация баланса «прочность-электропроводность-термостойкость-обрабатываемость») был выбран именно этот диапазон. 2) К сожалению, на рисунке 16 не прослеживаются точки, соответствующие состояниям Al-0,5Fe-0,3Cu (ЭМК) РКУП+ХП, Al-0,5Fe-0,3Cu (ЭМК) РКУП+ХВ, по-видимому из-за проблем печати. 3) В автореферате представлены оценки вкладов в упрочнение в электросопротивление от различных механизмов упрочнения и рассеяния заряда, полученные на основе параметров микроструктуры, однако, отсутствуют формулы для расчета и не представлен ряд необходимых параметров, например расстояния между частицами вторичной фазы (или суммарной объем этой фазы). Не ясно также, как учитывались вклады от твердого раствора. Полагаю, что в тексте диссертации такая информация имеется.

9. Гангало А.Н., к.т.н., заведующего лабораторией объемных и пленочных наноструктурированных материалов ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»; **Васильева С.В.**, к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника отдела электронных свойств металлов ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина». В отзыве указано, что исследованные серии сплавов, с различным содержанием железа относятся к классу электротехнических проводниковых материалов, для которых основными характеристиками являются механическая прочность, электропроводность и термостойкость, поэтому исследования, направленные на повышение этих свойств, представляются важными и актуальными. Замечания: 1) На рис. 1 и в тексте упоминается интерметаллидная фаза Al_xFe_y , однако не указан ее состав (это фазы Al_6Fe ?) 2) В тексте автореферата отсутствуют дифрактограммы. 3) В тексте автореферата не приведена методика оценки плотности дислокаций. 4) Не приведены данные по линейным размерам поперечного сечения образцов после деформационной обработки, трудно понять, как применим ГОСТ 1497-84 при испытаниях на растяжение. 5) Следовало обосновать выбор величины деформации при холодной прокатке/волочении, а также выбор угла пересечения каналов при РКУП и РКУП-К. 6) Помимо двухстадийной деформационной обработки РКУП/РКУП-К с последующей холодной прокаткой/волочением, следовало проанализировать влияние одностадийной деформационной обработки холодной прокаткой/волочением. Хотя это скорее пожелание, а не замечание.

10. Белова Н.А., д.т.н., профессора, главного научного сотрудника кафедры обработки металлов давлением ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». В отзыве отмечено, что улучшение комплекса свойств электропроводников из сплавов на основе алюминия является сегодня актуальной задачей, так как позволит расширить область их применения в системе передачи электроэнергии, в промышленности и транспорте. Поэтому актуальность диссертационной работы, в рамках которой предложен эффективный

подход повышения физико-механических свойств и термостойкости сплавов системы Al-Fe, предназначенных для применения в качестве проводниковых материалов, за счет использования перспективных методов литья в сочетании с деформационной обработкой, включающей интенсивную пластическую деформацию, очевидна. Замечания: 1) Не вполне корректно утверждение «... установлено, что сплавы с содержанием железа 0,5 и 1,7 вес.%, ..., по уровню физико-механических свойств и их термической стабильности сопоставимы с традиционными электротехническими сплавами системы Al-Zr и Al-PЗМ», поскольку термостойкость сплавов Al-Zr достигает 400 °С, а в диссертационной работе рассматривались температуры до 280 °С. 2) Идентификация фазы Al_2Fe вызывает вопросы. В частности, не указан ее структурный тип. Также непонятно при какой скорости кристаллизации происходит переход от фазы Al_6Fe (формирующийся в исходных слитках) к Al_2Fe (при ЭМК). 3) В автореферате отсутствует информация о термической стабильности метастабильной фазы Al_2Fe , которая при нагреве должна трансформироваться в равновесную фазу Al_3Fe , что предполагает огрубление структуры и снижение прочностных свойств.

11. Усыниной Г.П., к.т.н., главного металлведа ООО НПЦ Магнитной гидродинамики, отдел технологий и новых продуктов ЭМК, Общество с ограниченной Ответственностью Научно-производственный центр магнитной гидродинамики. В отзыве отмечено, что к новым научным результатам диссертационной работы относится применение электромагнитной кристаллизации, которая является инновационным методом диспергирования структуры и свойств алюминиевого сплава на этапе его приготовления и литья. Это позволяет управлять фазовым составом, получать ультрадисперсную структуру и отсутствие неметаллических включений, что является передовым направлением в материаловедении. Замечания: 1) В автореферате не указаны конкретно размеры изделий, которые были получены в результате ДО, включающей ИПД методом РКУП или РКУП-К и ХП или ХВ, и на которых проводились испытания механических свойств, электропроводность и термостойкость. 2) Необходимо уточнить, проволока или шина, каких размеров и из какого сплава предлагается для использования в качестве проводника электрического тока?

12. Абросимовой Г.Е., д.ф.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории структурных исследований ФГБУП Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна. В отзыве отмечено, что в диссертации Жуковой О.О. предлагается решение научно-технической задачи по созданию перспективных алюминиевых сплавов электротехнического назначения за счет легирования алюминия железом (и медью), а также за счет использования различных методик получения и обработки сплавов в целях достижения в проводниках рационального сочетания прочности, электропроводности и термостойкости. Поскольку создание материалов со специальными свойствами является одним из приоритетных направлений физического материаловедения, актуальность диссертации Жуковой О.О. не вызывает сомнений. Замечания: 1) В работе не указано, чем обусловлена фрагментация интерметаллидных частиц в образце, полученного традиционным методом литья, с промежуточной концентрацией железа (Al-1,7Fe) после ИПД?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой компетентностью в данной области наук, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана научная концепция, где отражено, что метод непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор и двухэтапной деформационной обработки, включающей интенсивную пластическую деформацию методами равноканального углового прессования (РКУП) или РКУП по схеме Конформ (РКУП-К), а также холодную прокатку или холодное волочение, обеспечивает формирование в сплавах Al-0,5Fe, Al-0,5Fe-0,3Cu, Al-1,7Fe и Al-2,5Fe, наноструктурированных состояний, характеризующихся ультрамелкозернистой структурой алюминиевой матрицы, отличающейся тем, что размер наночастиц фазы Al_2Fe уменьшается до 70 ± 10 нм, что позволяет достичь наиболее благоприятного сочетания «прочность-электропроводность» по сравнению со сплавами, полученными традиционными методами литья;

предложен способ получения электрического проводника из сплава системы Al-Fe, включающий непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор и холодную деформацию, включающую волочение или прокатку литой заготовки, определен рациональный интервал содержания железа (1,0-2,2 вес.%), обеспечивающий получение пластин или проволоки электротехнического назначения; на указанный способ получен патент РФ на изобретение № 2815427;

доказана перспективность использования новых идей в науке за счет использования прогрессивных методов литья в сочетании с деформационной обработкой, включающей интенсивную пластическую деформацию, для повышения физико-механических свойств и термостойкости сплавов системы Al-Fe, предназначенных для применения в качестве проводниковых материалов в электротехнике.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что наличие и содержание наночастиц фазы Al_2Fe размером до 70 ± 10 нм в наноструктурированных сплавах системы Al-Fe обеспечивает достижение заданного уровня физико-механических свойств и их термостойкости для применения в электротехнике;

применительно к проблематике диссертации результативно **использован** комплекс существующих базовых методов исследования микроструктуры образцов сплавов, таких как как растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия и рентгеноструктурный анализ, а также механические испытания на растяжение, измерение удельного электросопротивления и/или электрической проводимости проводников и оценка уровня их термостойкости;

изложены доказательства гипотезы о том, в сплавах системы Al-Fe, для измельчения частиц второй фазы (алюминидов железа) до нанометрического диапазона размеров, необходимо, во-первых, реализовать высокую скорость кристаллизации расплава ($\geq 10^3$ К/с), используя, например, метод непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор, во-вторых, осуществить последующую двухэтапную

деформационную обработку, на первом этапе которой используется интенсивная пластическая деформация, реализуемая методами РКУП или РКУП-К при комнатной температуре, а на втором этапе – деформация волочением или прокаткой;

раскрыто, что финальная предлагаемая холодная деформация, выполненная методами прокатки или волочения, традиционно используемыми при производстве проводников в кабельной промышленности, позволяет придать экспериментальным образцам из наноструктурированных Al-Fe сплавов необходимую геометрию, что позволяет изготовить широкий спектр кабельной продукции и проводов, а также повысить их прочностные характеристики без потери электропроводности;

изучен уровень физико-механических свойств и термостойкости в сплавах Al-Fe и установлено, что метод непрерывного литья в ЭМК в сочетании с последующей двухэтапной деформационной обработкой позволяет получить высокопрочные термостойкие проводниковые материалы из сплавов Al-Fe с содержанием железа от 0,5 до 2,5 вес. %, а также из сплава Al-0,5Fe, с малой добавкой меди (0,3 вес. %);

проведена модернизация существующего метода производства проводников из алюминиевых сплавов; предлагается решение на основе легирования алюминия распространенным и дешевым материалом – железом, которое за счет предложенной технологической схемы, включающей метод непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор и двухэтапную деформационную обработку методом РКУП или РКУП-К с последующей деформацией волочением или прокаткой, позволяет получать проводники из сплавов Al-Fe, обладающие рациональным сочетанием прочности, электропроводности и термостойкости, требуемым для проводниковых материалов в электротехнике.

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

разработаны и внедрены технологические рекомендации в отношении состава сплава Al-Fe, методов литья и деформационных режимов получения наноструктурированных сплавов Al-Fe, для применения в электротехнике, в производственный процесс «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск);

определены перспективы практического использования результатов исследования наноструктурированных сплавов системы Al-Fe для применения в качестве проводниковых материалов в электротехнике;

созданы практические рекомендации на основе способа получения проводника из сплава системы Al-Fe с рациональным содержанием железа 1,0-2,2 вес. %, включающего непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор и деформационную – холодную деформацию литой заготовки, что обеспечивает получение пластин или проволоки электротехнического назначения;

представлены рекомендации использования интенсивной пластической деформации в сочетании с традиционными методами холодной деформации – прокаткой или волочением, что обеспечивает формирование в исследуемых сплавах наноструктурированных состояний, характеризующихся ультрамелкозернистой структурой алюминиевой матрицы, содержащих частицы второй фазы (алюминиды железа), имеющих нанометрические размеры от 70 ± 10 нм до 90 ± 20 нм и вносящих

заметный вклад в достижение повышенного уровня прочностных характеристик Al-Fe сплавов, а также их термической стабильности.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

для экспериментальных работ результаты получены на сертифицированном оборудовании центра коллективного пользования «Нанотех» УУНиТ;

теория построена на известных и новых фактах, согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

идея базируется на обобщении передового опыта путем анализа публикаций о проводниковых материалах на основе алюминия и их особенностях;

использованы сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике, а также результатов, опубликованных в рецензируемых научных журналах по тематике диссертационной работы;

установлено качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике, а также согласованность полученных результатов между собой и с результатами других научных групп, опубликованных в литературе по теме диссертационной работы;

использованы современные методики исследований, статистической обработки полученных результатов, представительные выборочные совокупности с обоснованием выбора образцов и методов исследования.

Личный вклад соискателя состоит в: поиске и анализе научной литературы по теме работы; участии на всех этапах постановки задач исследования, формулировании научной новизны и положений, выносимых на защиту; участии в выборе химических композиций материалов исследования – алюминиевых сплавов системы Al-Fe, литейных методов их получения, разработке режимов двухэтапной деформационной обработки, включающей интенсивную пластическую деформацию методами равноканального углового прессования (РКУП) или РКУП по схеме Конформ и последующие холодную прокатку или холодное волочение; участии в назначении режимов термической обработки для определения уровня термостойкости экспериментальных наноструктурированных образцов; получении и анализе экспериментальных данных о микроструктурных особенностях алюминиевых сплавов в зависимости от содержания Fe, литейных методов их получения, режимов деформационной и термической обработки, полученных методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа; проведении обработки и анализа механических свойств и электрической проводимости, экспериментальных образцов на всех этапах их исследования; осуществление оценки вкладов параметров микроструктуры, в частности наноразмерных фаз алюминидов железа, в уровень прочности и электропроводности наноструктурированных сплавов Al-Fe; участии в подготовке и написании публикаций по выполненной работе, а также представлении полученных результатов на конференциях.

В ходе защиты диссертации критические замечания высказаны не были, заданы вопросы уточняющего и конкретизирующего характера. Соискатель Жукова О.О. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию.

На заседании 26.12.2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Жуковой Ольге Олеговне ученую степень кандидата технических наук по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы за решение научной задачи создания перспективных алюминиевых сплавов электротехнического назначения, за счет легирования алюминия распространенным и дешевым материалом – железом, а также за счет использования технологической схемы, включающей метод непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор и двухэтапную деформационную обработку, включающую РКУП или РКУП-К с последующей деформацией холодной прокаткой или холодным волочением, что обеспечивает достижение в проводниках рационального сочетания прочности, электропроводности и термостойкости.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из них 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 14, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель диссертационного совета

Валиев Руслан Зуфарович

Ученый секретарь диссертационного совета

Бобрук Елена Владимировна

26 декабря 2025 года

