

На правах рукописи



Жукова Ольга Олеговна

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И
ТЕРМОСТОЙКОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ
Al-Fe ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ**

Специальность 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Научный руководитель: кандидат технических наук
Мурашкин Максим Юрьевич

Официальные оппоненты:

Бродова Ирина Григорьевна

доктор технических наук, профессор, ФГБУН Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), главный научный сотрудник лаборатории цветных сплавов.

Маркушев Михаил Вячеславович

доктор технических наук, ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (ИПСМ РАН), главный научный сотрудник, заведующий лабораторией «Материаловедение и технологии лёгких сплавов».

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), г. Белгород.

Защита состоится «26» декабря 2025 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.14 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/dc/dissertations/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.479.14,
к.т.н., доцент

Е.В. Бобрук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проводники из алюминия и сплавов на его основе сегодня широко применяются в электротехнике и в транспортных системах различного назначения, постепенно замещая существенно более дорогие аналоги, выполненные из меди.

Проблема ограниченной прочности, пропускной способности и стабильности физико-механических свойств определяет повышенный интерес исследователей к созданию высокопрочных и термостойких проводниковых сплавов на основе алюминия.

На сегодняшний день достигнуты обнадеживающие результаты в разработке проводников с улучшенными характеристиками на основе низколегированных сплавов систем Al-Zr, Al-Mg-Zr, Al-Mg-Si и сплавов алюминия с редкоземельными металлами (РЗМ) с использованием разнообразных методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Такая обработка позволяет формировать в сплавах ультрамелкозернистую (УМЗ) и нано-структуры, содержащие частицы интерметаллидных фаз, регламентированные по химическому составу, размерам и морфологии.

Сплавы системы Al-Fe очень привлекательны для использования в качестве проводников, так как их основной легирующий элемент – железо, является самым распространенным и дешевым металлом, практически нерастворимым в алюминии, что благоприятно сказывается на уровне его электропроводности. Также представляет интерес развитие системы сплавов Al-Fe с малыми добавками меди, которая оказывает положительное влияние на прочность, существенно не влияя на их электропроводность. В России и за рубежом освоено производство проводников на основе системы Al-Fe, например, таких марок как 8030 и 8176, содержание железа в которых не превышает 1 вес.%. Однако, как и чистый алюминий, они демонстрируют низкую механическую прочность и нестабильность свойств при повышенных температурах эксплуатации. Осуществленные ранее попытки улучшить комплекс физико-механических свойств сплавов Al-Fe путем измельчения структурных параметров до нанометрического диапазона размеров, используя ИПД, показали, что сочетание высокой прочности и улучшенной термостойкости можно достичь в наноструктурированных образцах с помощью обработки методом кручения под высоким давлением (КВД), однако этот метод не пригоден для коммерческого производства проводников.

В последнее время для получения проводниковых алюминиевых сплавов начали использовать метод непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). При его реализации, за счет высокой скорости кристаллизации, которая превышает 10^3 К/с, в сплавах системы Al-РЗМ удалось получить высокодисперсную структуру, состоящую из смеси алюминия и эвтектики, в состав которой входит наноразмерная интерметаллидная фаза $\text{Al}_{11}(\text{Ce},\text{La})_3$. В образцах сплавов системы Al-РЗМ, полученных методом литья в ЭМК после ИПД методом КВД, формируется УМЗ структура, происходит дополнительное измельчение наночастиц фазы $\text{Al}_{11}(\text{Ce},\text{La})_3$ до нанометрических размеров. Это наноструктурированное состояние обеспечивает им уникальное сочетание прочности, электропроводности и термостойкости. Однако, содержание РЗМ в сплаве системы Al-РЗМ может достигать 9 вес.%, а метод их обработки, как отмечалось выше, не пригоден для серийного коммерческого применения и при этом РЗМ очень дорогостоящие металлы.

В связи с этим, в рамках настоящей работы предлагается решение научно-технической задачи создания перспективных алюминиевых сплавов электротехнического назначения, за счет легирования алюминия наиболее распространенным и дешевым материалом – железом, а также за счет использования технологической схемы, включающей метод непрерывного литья в ЭМК и

двухэтапную деформационную обработку (ДО) равноканальным угловым прессованием (РКУП) или РКУП по схеме Конформ (РКУП-К) с последующей деформацией холодной прокаткой (ХП) или холодным волочением (ХВ) в целях достижения в проводниках рационального сочетания прочности, электропроводности и термостойкости.

Степень разработанности темы исследования. В разработку и исследование различных подходов, позволяющих повысить прочностные характеристики и термостойкость проводниковых материалов на основе алюминия, при сохранении высокого уровня электрической проводимости существенный вклад внесли: Воронцова Л.А., Белов Н.А., Валиев Р.З., Мурашкин М.Ю., Медведев А.Е., Орлова Т.С., Рогачев С.О., Sauvage X., Horita Z., Cubero-Sesin J.N., Hou J.P. и др. В частности, научно-исследовательские работы российских и зарубежных ученых связаны с изучением влияния различных методов получения и обработки, а также химического состава и особенностей микроструктуры на физико-механические свойства алюминиевых сплавов. В большом количестве исследований показано, что одним из подходов существенного повышения прочности при сохранении электропроводности сплавов является их наноструктурирование с использованием методов ИПД.

Цели и задачи

Цель работы: повысить физико-механические свойства и термостойкость сплавов системы Al-Fe, предназначенных для применения в качестве проводниковых материалов в электротехнике, за счет использования перспективных методов литья в сочетании с деформационной обработкой, включающей интенсивную пластическую деформацию.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследовать влияние методов традиционного литья в кокиль, литья совмещенного с прокаткой и перспективного метода непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор на микроструктуру, физико-механические свойства и электропроводность сплавов системы Al-Fe с содержанием железа от 0,5 до 3,4 вес.%.

2. Исследовать влияние методов литья, содержания железа и двухэтапной деформационной обработки, включающей на первом этапе РКУП или РКУП-К, а на втором этапе ХП или ХВ, на микроструктуру, физико-механические свойства и термостойкость сплавов системы Al-Fe.

3. Исследовать влияние малой добавки меди (0,3 вес.%) на микроструктуру, физико-механические свойства и термостойкость сплава Al-0,5Fe, полученного методом литья ЭМК и подвергнутого двухэтапной деформационной обработке.

4. Разработать рекомендации по выбору рационального содержания железа, методов литья и режимов деформационной обработки, обеспечивающих наилучшую комбинацию прочности, электропроводности и термостойкости в сплавах системы Al-Fe и апробировать их на производстве.

Научная новизна:

1. Установлено, что в сплавах системы Al-Fe с содержанием железа от 0,5 до 2,5 вес.%, полученных непрерывным литьем в ЭМК, формируется микроструктура, образованная алюминиевой матрицей и эвтектикой (Al)+Al₂Fe, отличающаяся тем, что в состав эвтектики входят наноразмерные частицы (90±20 нм) метастабильной фазы Al₂Fe.

2. Установлено, что дополнение метода непрерывного литья в ЭМК двухэтапной ДО, включающей ИПД методами РКУП или РКУП-К и ХП или ХВ, обеспечивает формирование в сплавах Al-0,5Fe, Al-0,5Fe-0,3Cu, Al-1,7Fe и Al-2,5Fe, наноструктурированных состояний, характеризующихся УМЗ структурой алюминиевой матрицы, отличающейся тем, что размер наночастиц фазы Al₂Fe уменьшается до 70±10 нм, что позволяет достичь наиболее благоприятного сочетания

«прочность-термостойкость» по сравнению со сплавами, полученными традиционными методами литья.

3. Установлено, что малая добавка меди (0,3 вес.%) в сплаве Al-0,5Fe, полученном литьем в ЭМК и подвергнутом двухэтапной ДО, позволяет сформировать в нем наноструктурированное состояние, обеспечивающее существенное увеличение прочности, отличающиеся тем, что предел прочности увеличивается в 1,5 раза по сравнению с наноструктурированным сплавом без меди, достигая 309 МПа.

4. Установлено, что метод непрерывного литья в ЭМК с последующей двухэтапной ДО для сплавов Al-Fe с содержанием железа 1,0-2,2 вес.% позволяет получить высокопрочные термостойкие электропроводные материалы, отличающиеся тем, что предел прочности таких материалов достигает до 310 МПа, электропроводность – до 58,5% IACS и термостойкость (температура длительной эксплуатации) до 150 °C, что позволяет их использовать в качестве проводниковых материалов в электротехнике.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая значимость работы заключается в том, что определен тип и обоснованы количественные характеристики наноразмерных элементов микроструктуры, наличие и содержание которых в сплавах системы Al-Fe обеспечивает достижение заданного уровня физико-механических свойств и их термической стабильности для применения в электротехнике.

1. Предложен метод литья и двухэтапной ДО сплавов системы Al-Fe, позволяющий получить в них наноструктурированные состояния, обеспечивающие заданное сочетание прочности в диапазоне от 239 до 310 МПа, электропроводности от 51,3 до 58,5% IACS и термостойкости (температура длительной эксплуатации до 150 °C), который может быть использован при выполнении опытно-технологических работ при производстве электропроводников.

2. Определено рациональное содержание железа (1,0-2,2 вес.%) в сплавах системы Al-Fe, полученных методом непрерывного литья в ЭМК, режимы их ДО, обеспечивающий комплекс прочности, электропроводности и термостойкости, позволяющий рассматривать их в качестве альтернативы используемым традиционным сплавам системы Al-Zr, Al-P3M и Al-Mg-Si.

3. Предложен способ получения проводника из сплава системы Al-Fe, включающий непрерывное литье в ЭМК и ДО – холодную деформацию литой заготовки, обеспечивающий получение пластин или проволоки электротехнического назначения из сплава Al-1,7Fe вес.%. Получен патент РФ №2815427.

Результаты диссертационной работы были использованы в производственных условиях компании ООО «Научно-производственный центр магнитной гидродинамики», что подтверждено актом использования результатов от 21.11.2024 г, г. Красноярск).

Методология и методы исследования

Работа выполнена с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. Для исследований использовали образцы сплавов системы Al-Fe, полученных способом литья в кокиль, совмещенного литья и прокатки (СЛП), а также непрерывного литья в ЭМК, образцы литого сплава прошли двухэтапную ДО с применением ИПД, осуществленной методом РКУП или непрерывного РКУП-К и последующей деформации методом ХП или ХВ. В работе для решения поставленных задач использовались современные методы исследования: растровая электронная микроскопия (РЭМ) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), рентгеноструктурный анализ (РСА), а также механические испытания на растяжение, измерение удельного электросопротивления проводников и оценка термической стойкости материала.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение метода литья в ЭМК с последующей двухэтапной ДО, включающей ИПД и ХП или ХВ для сплавов Al-0,5Fe, Al-0,5Fe-0,3Cu, Al-1,7Fe и Al-2,5Fe, позволяющее сформировать наноструктурированные состояния, характеризующееся УМЗ структурой алюминиевой матрицы с наноразмерными частицами фазы Al₂Fe (соответствует п. 1.1 паспорта специальности).

2. Закономерности эволюции микроструктуры и фазового состава сплавов системы Al-Fe, в зависимости от используемых методов литья, последующей обработки, включающей ИПД методом РКУП или РКУП-К и ХП или ХВ, а также после отжига (соответствует п. 1.2 паспорта специальности).

3. Вклад микроструктурных механизмов и наноразмерных частиц фазы Al₂Fe в упрочнение сплавов системы Al-Fe, полученных непрерывным литьем в ЭМК и подвергнутых двухэтапной ДО, включающей ИПД методом РКУП или РКУП-К и ХП или ХВ, позволяющий достичь высокую прочность материала (соответствует п. 1.5 паспорта специальности).

4. Рациональное содержание железа (1,0-2,2 вес.%) в сплаве Al-Fe с наноразмерными частицами фазы Al₂Fe, обеспечивающее высокий уровень физико-механических свойств и термостойкости (соответствует п. 1.5 паспорта специальности).

Степень достоверности и аprobация результатов

Степень достоверности и обоснованности результатов диссертационной работы обеспечивается использованием независимых, взаимодополняющих современных методов исследования, применяемых в современном материаловедении, и большим объемом экспериментальных данных, использованием уникальных установок для осуществления ИПД и промышленного оборудования, а также непротиворечивостью диссертационного исследования с исследованиями других авторов и аprobацией основных результатов работы через публикации в отечественных научных ВАК-изданиях, а также международных площадках Web of Science и Scopus, представление результатов научных исследований на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

Результаты научных исследований представлены и обсуждены на V Международной научно-технической конференции «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2021 г.); XIX Всероссийской конференции «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); девятой Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» (г. Москва, 2021 г.); Всероссийской научной конференции с международным участием «IV Байкальский материаловедческий форум» (г. Улан-Удэ, 2022 г.); XI Международной школы «Физическое материаловедение» (г. Тольятти, 2023 г.); третьей Международной школы-конференции молодых ученых «Кайбышевские чтения» (г. Уфа, 2023 г.); LXVII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (г. Екатеринбург, 2024 г.); Всероссийской конференции с международным участием «Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах» (г. Уфа, 2024 г.), Международной конференции «UUST Nanomaterials Days» (г. Уфа, 2024 г.).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 20-79-10133 «Разработка и исследование перспективных проводниковых материалов на основе алюминия для использования в передовых транспортных системах» и в рамках выполнения государственного задания «Разработка критических технологий создания силовых установок для малой и региональной авиации, а также беспилотных авиационных систем» № FEUE-2023-0007 (2023-2025 г.г). («Уфимский университет науки и технологий»).

Личный вклад автора заключается в поиске и анализе научной литературы по теме работы. Автор совместно с научным руководителем определил цели и задачи

исследования, непосредственно участвовал в выполнении экспериментальных исследований, в перепроверке достоверности полученных результатов. Под руководством к.ф.-м.н. Медведева А.Е. в рамках проекта РНФ, в составе научной группы, автором проведена аттестация микроструктуры и свойств экспериментальных образцов проводников из наноструктурированных сплавов системы Al-Fe. Совместно с научным руководителем и другими соавторами научного коллектива, автор принимал участие в интерпретации и обсуждении результатов экспериментов, подготовке, написании и публикаций статей.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 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.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 168 страницах, включает 62 рисунка и схем, 42 таблицы. Список использованной литературы содержит 226 наименования. Работа состоит из введения, пяти глав, каждая из которых завершается выводами, заключения и списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована важность и актуальность темы научно-квалификационной работы (диссертации), сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, обоснованы достоверность и апробация результатов.

В **первой главе** представлен литературный обзор по теме диссертационной работы, посвященный современным проводникам на основе алюминия. Особое внимание уделено алюминиевым сплавам, демонстрирующим высокий уровень физико-механических и эксплуатационных свойств, перспективным методам их производства, например, таким как непрерывное литье в ЭМК, а также методам их последующей обработки. Отмечена перспективность использования в качестве проводников сплавов системы Al-Fe, обладающих невысокой стоимостью по сравнению с другими сплавами. Проведен анализ публикаций, посвященных исследованиям возможности улучшения свойств проводниковых сплавов за счет формирования в них УМЗ и наноструктурированных состояний, используя методы ИПД.

Во **второй главе** приведены материалы исследования и описаны методики проведения исследований. В работе объектами исследования были сплавы системы Al-Fe.

Катанка из сплава 8176 с содержанием железа 0,5 вес.% произведена на Кандалакшском Алюминиевом заводе ОК «РУСАЛ» (г. Кандалакша, Россия) методом СЛП. Диаметр катанки 9,5 мм. Исходные заготовки сплавов Al-1,7Fe, Al-3,4Fe (вес.%) в виде прутков диаметром 22 мм и длиной около 200 мм получены на кафедре обработки металлов давлением в Российском национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» (г. Москва) методом литья в кокиль (скорость охлаждения – около 20 К/с).

Заготовки из сплавов Al-0,5Fe, Al-1,7Fe, Al-2,5Fe, Al-0,5Fe-0,3Cu (вес. %) получены в виде прутков диаметром 11 мм методом непрерывного литья в ЭМК в ООО «Научно-практический центр магнитной гидродинамики» (Красноярск, Россия). Скорость охлаждения – не менее 10³ К/с.

Исходные образцы сплавов подвергались 4 циклам РКУП или РКУП-К при комнатной температуре (КТ) по режиму Вс (с поворотом вокруг оси образца на 90°) в оснастке с углом сопряжения каналов 120°.

После ИПД образцы сплавов подвергались ХП за шесть переходов с общей степенью деформации 85% или ХВ за 8 переходов с суммарной деформацией (обжатием) 94%.

Определение уровня термостойкости проводилось по результатам отжига при температурах 230 и 280 °С в течение 1 часа в соответствии требованиями стандартов ГОСТ Р МЭК 62004-2014 и IEC 62641:2023.

Исследование параметров микроструктуры проводились по изображениям, полученные методами ПЭМ и РЭМ.

РСА проводили на дифрактометре с использованием монохроматического Cu-К α -излучения (длина волны $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$). Значения параметра решетки (a), размеры области когерентного рассеяния (ОКР) и уровня упругих микроискажений ($\langle\epsilon^2\rangle^{1/2}$) вычислялись с помощью программного обеспечения MAUD по методу Ритвельда.

Механические испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84. Механические испытания проволоки осуществлялись по ГОСТ 10446-80.

Величины удельной электрической проводимости (УЭП) образцов сплавов определяли вихревоковым методом по ГОСТ 27333-87, а удельное электрическое сопротивление (УЭС) измеряли стандартным четырехточечным/четырехзондовым методом по ГОСТ 7229-76.

В третьей главе представлены результаты исследований микроструктуры и физико-механических свойств сплавов системы Al-Fe с содержанием железа от 0,5 вес.% (сплав марки 8176) до 3,4 вес.%, полученных традиционными методами литья после двухэтапной ДО, включающей РКУП.

На Рисунке 1 продемонстрирована микроструктура исходных образцов сплавов. В катанке сплава 8176, в результате СЛП формируется микроструктура, состоящая из вытянутых в направлении деформации субзерен шириной $1,5\pm0,3 \text{ мкм}$ и длиной до 4 мкм (Рисунок 1 а).

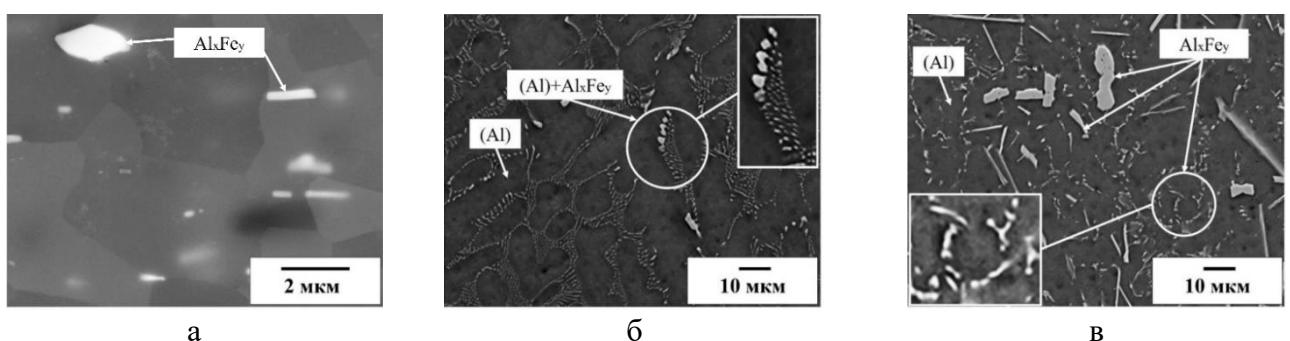


Рисунок 1 – Исходная микроструктура сплавов Al-Fe: а – 8176, б – Al-1,7Fe, в – Al-3,4Fe

В процессе прокатки, реализуемой на второй стадии СЛП, образуются скопления интерметаллидных частиц в виде строчек, большинство из которых имеют форму стержней. Размер частиц составляет $310\pm45 \text{ нм}$, длиной до 2 мкм. Объемная доля интерметаллидных фаз составляет $2,9\pm0,5\%$. Микроструктура сплава Al-1,7Fe (Рисунок 1 б) состоит из алюминиевой матрицы и эвтектической фазы ($\text{Al}+\text{Al}_x\text{Fe}_y$), образующей стенки дендритных ячеек алюминия со средним размером $13\pm5 \text{ мкм}$. Объемная доля интерметаллидной фазы, входящей в состав эвтектики в сплаве Al-1,7Fe составляет $6,1\pm1,0\%$. Частицы фазы, входящие в состав эвтектики, имеют форму тонких пластин толщиной $300\pm100 \text{ нм}$ и длиной до 10 мкм. В микроструктуре сплава Al-3,4Fe наблюдаются более грубые интерметаллидные частицы, имеющие преимущественно форму в виде стержней, толщиной до 2 мкм и длиной 12 мкм, которые хаотично ориентированы в алюминиевой матрице. В структуре также наблюдаются ячейки, размером от 10 до 30 мкм, стенки которых образованы эвтектикой, содержащей алюминиды железа толщиной менее 1 мкм, длиной от 2 до 4 мкм. Объемная доля интерметаллидных частиц составляет $11,0\pm2,1 \text{ \%}$ (Рисунок 1 в).

По данным РСА установлено, что в образцах всех сплавов в процессе кристаллизации расплава образуются преимущественно интерметаллидные частицы фазы Al_6Fe . Период решетки (*a*) литых сплавов практически совпадает с величиной *a* характерным для чистого алюминия, что свидетельствует об отсутствии признаков формирования твердого раствора железа в алюминии.

Вид типичной УМЗ структуры, сформированной в результате ИПД методом РКУП, представлена на примере сплава Al-1,7Fe (Рисунок 2).

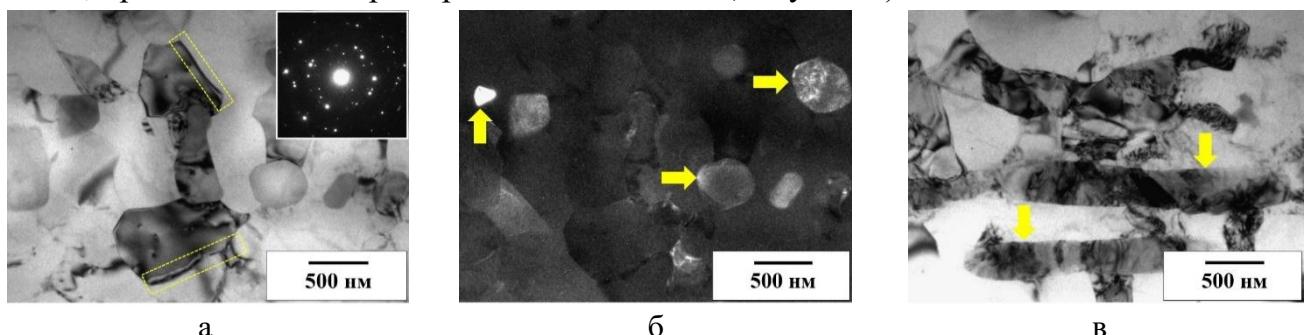


Рисунок 2 – Микроструктура сплава Al-1,7Fe после РКУП (ПЭМ): а – поперечное сечение, б – темнопольное изображение, в – продольное сечение (стрелками отмечены частицы фазы Al_6Fe)

В результате ИПД во всех материалах сформировалась УМЗ структура с преимущественно равноосными зернами (Рисунок 2 а, б). Средний размер зерна уменьшается с увеличением содержание железа и составляет 920 ± 140 нм в сплаве 8176 и 695 ± 160 нм в сплаве Al-1,7Fe. Судя по виду картины электронной дифракции, УМЗ структура образована преимущественно большеугловыми границами зерен (БУГЗ). Интерметаллидные частицы в результате РКУП не претерпели заметных изменений ни в морфологии, ни в размере. В темнопольном изображении ПЭМ (Рисунок 2 б) хорошо видно, что в поперечном сечении образца, обработанного РКУП, частицы Al_6Fe имеют сферическую форму. В отличии от сплава 8176, в сплаве с содержанием железа 1,7 вес.% в результате ИПД отмечается фрагментация интерметаллидных частиц имеющих форму тонких пластин входящих в состав эвтектики, толщина которых составила 335 ± 65 нм и длиной ~ 2500 нм. В сплаве Al-3,4Fe, как и в сплаве 8176, в исходной микроструктуре присутствовали в основном крупные интерметаллиды, при этом ДО методом РКУП не приводит к заметным изменениям их размеров.

По данным РСА параметр *a* в литых сплавах после РКУП не изменяется, что свидетельствует об отсутствии признаков образования твердого раствора. УМЗ сплавы с повышением содержания Fe характеризуются более высокой плотностью дислокаций. В УМЗ сплаве 8176 плотность дислокаций составляет $0,3 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$, а в сплаве Al-1,7Fe – $1,3 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$ соответственно.

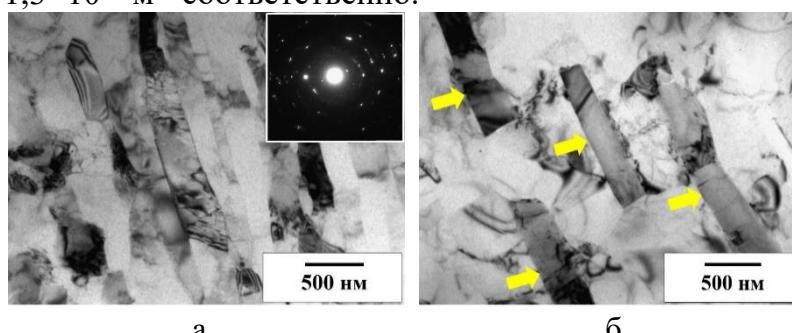


Рисунок 3 – Микроструктура сплава Al-1,7Fe после РКУП и ХП в продольном сечении (ПЭМ) (частицы фазы Al_6Fe , отмечены стрелками)

260 ± 100 нм для сплавов 8176 и Al-1,7Fe соответственно) (Рисунок 3 б).

Типичная УМЗ структура, сформированная в материалах исследования после дополнительной ДО методом ХП представлена на Рисунке 3. Она образована зернами в виде волокон, ориентированных в направлении деформации (Рисунок 3 а, б). Ширина зерен заметно меньше в УМЗ сплаве с содержанием железа 1,7 вес.% (среднее значение 445 ± 120 нм и

ХП не привела к заметному изменению размеров интерметаллидных частиц. Отмечается лишь некоторое уменьшение их длины, что свидетельствует об их дальнейшей фрагментации при ХП. По данным РСА в результате ХП в УМЗ сплавах отмечается дальнейшее повышение плотности дислокаций.

Формирование УМЗ структуры после РКУП привело к увеличению предела прочности сплавов с содержанием железа 0,5 вес.% на 53 МПа, 1,7 вес.% - на 96 МПа, а 3,4 вес.% - на 20 МПа. Относительное удлинение образцов снизилось с 32 до ~ 13 %. При этом электропроводность практически не изменилась (Рисунок 4 б). Дополнительная ХП обеспечила дальнейшее упрочнение УМЗ материалов: на 16 МПа для сплава 8176 и на 56 МПа для сплава Al-1,7Fe (Рисунок 4 а), а их относительное удлинение осталось на уровне не ниже 10%. Электропроводность УМЗ образцов изменилась незначительно.

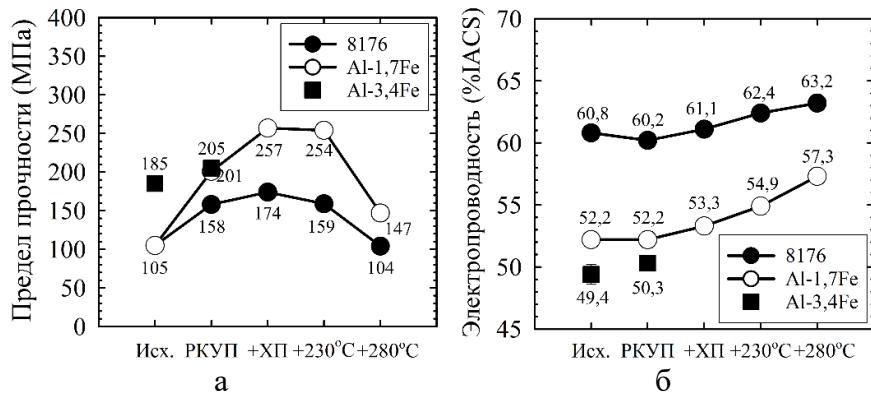


Рисунок 4 – Изменение свойств сплавов Al-Fe:
а – предел прочности на растяжение, б – электропроводность

более 40%, при этом отмечается заметное увеличение электропроводности в диапазоне 1-4% IACS (Рисунок 4 б).

Изменения физико-механических свойств после отжига в УМЗ сплавах в основном обусловлены увеличением размера ультрамелких зерен. В сплавах 8176 и Al-1,7Fe средняя ширина волокон составила 950 ± 170 нм и 685 ± 260 нм соответственно, а длина в направлении ХП не изменилась. Размер частиц фазы Al_6Fe , после отжигов при 230 и 280 °C также не претерпел изменений.

По совокупности полученных экспериментальных данных установлено, что сплавы с содержанием железа 0,5 и 1,7 вес.%, полученные традиционными методами литья после двухэтапной ДО, включающей ИПД, по уровню физико-механических свойств и их термической стабильности сопоставимы с традиционными электротехническими сплавами системы Al-Zr и Al-PЗМ. При этом прочностные характеристики УМЗ образцов из исследуемых сплавов не достигают уровня свойств наиболее прочных сплавов системы Al-Mg-Si, в настоящее время используемых в электротехнике.

В четвертой главе представлены результаты исследований микроструктуры и физико-механических свойств сплавов системы Al-Fe с содержанием железа от 0,5 до 2,5 вес.%, полученных методом литья в ЭМК, подвергнутые двухэтапной ДО, осуществленной методами РКУП или РКУП-К. На втором этапе ДО использовали ХП или ХВ.

Микроструктура сплавов в литом состоянии представляет собой алюминиевую матрицу и эвтектическую фазу, образованную алюминием и интерметаллидами Al_xFe_y (Рисунок 5). Повышение содержания железа в сплавах сопровождается увеличением количества эвтектики и соответственно интерметаллидной фазы. В сплаве Al-0,5Fe эвтектика носит дискретный характер (Рисунок 5 а), в отличии от сплавов Al-1,7Fe и Al-2,5Fe, в которых она образует сплошную сетку (Рисунок 5 б, в).

Оценка термической стабильности свойств УМЗ образцов, выполненная на сплавах 8176 и Al-1,7Fe после двухэтапной ДО, показала, что они претерпевают заметное разупрочнение только после отжига при 280 °C (Рисунок 4 а). Снижение прочности составляет пластиичности и прирост

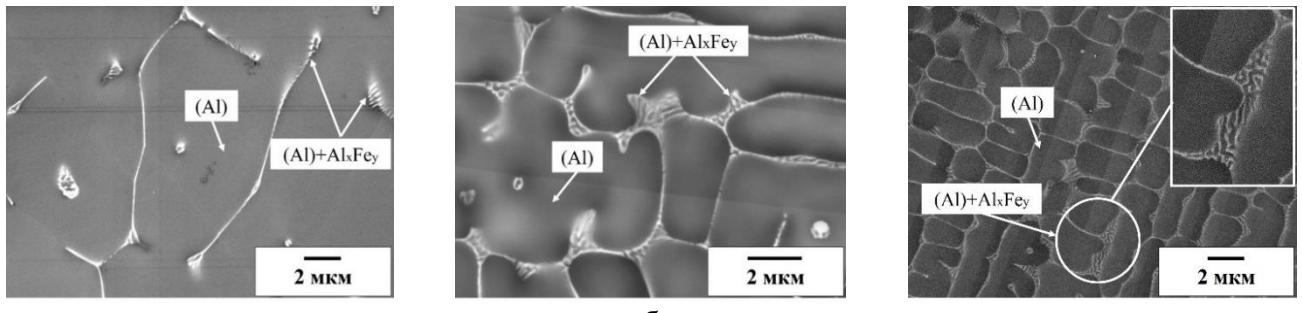


Рисунок 5 – Микроструктура сплавов Al-Fe, полученных литьем в ЭМК: а – Al-0,5Fe, б – Al-1,7Fe, в – Al-2,5Fe

Средний размер дендритной ячейки в сплавах составляет в Al-0,5Fe – $5,8 \pm 0,6$ мкм, в Al-1,7Fe – $4,6 \pm 1,5$ мкм, в Al-2,5Fe – $1,7 \pm 0,1$ мкм. Толщина алюминидов железа, имеющих форму тонких ламелей, входящих в состав эвтектики: в сплаве Al-0,5Fe составляет 150 ± 40 нм, в Al-1,7Fe – 90 ± 20 нм, в Al-2,5Fe 150 ± 40 нм. Длина частиц достигает 1,5 мкм. Объемная доля частиц алюминидов железа, входящей в состав эвтектики: в сплаве Al-0,5Fe составляет $2,9 \pm 1,5\%$, в сплаве Al-1,7Fe – $4,9 \pm 1,0\%$, в сплаве Al-2,5Fe – $16,3 \pm 4,2\%$.

PCA выявил образование необычной метастабильной интерметаллической триклиновой фазы типа Al_2Fe во всех сплавах, полученных литьем в ЭМК, в процессе которого реализуется скорость охлаждения расплава не менее 10^3 К/с.

Типичная микроструктура, сформированная в сплавах Al-Fe после 4 проходов РКУП представлена на Рисунке 6, проиллюстрирована на примере сплава Al-1,7Fe.

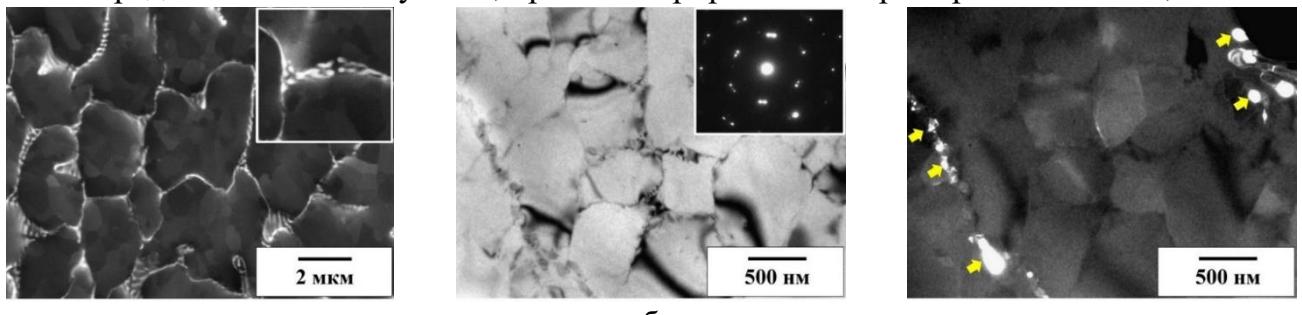


Рисунок 6 – Микроструктура сплава Al-1,7Fe: а – изображение РЭМ, поперечное сечение, б – ПЭМ, светлопольное изображение, в – ПЭМ, темнотпольное изображение, продольное сечение, с указанием частиц фазы Al_2Fe

В результате РКУП во всех материалах исследования отмечается формирование УМЗ структуры. Средний размер зерна в сплавах Al-0,5Fe, Al-1,7Fe и Al-2,5Fe составил 890 ± 40 нм, 620 ± 20 нм, и 560 ± 20 нм соответственно. Зерна преимущественно равноосные (Рисунок 6 а). Судя по виду электронной дифракции, УМЗ структура образована в основном сеткой БУГЗ. Формирование УМЗ структуры сопровождается фрагментацией интерметаллидных частиц Al_2Fe входящих в состав эвтектики до нанометрического диапазона размеров (в сплаве Al-0,5Fe до 65 ± 10 нм, в Al-1,7Fe до 85 ± 25 нм, в Al-2,5Fe до 50 ± 15 нм) (Рисунок 6 б, в). Их распределение остается близким к литому состоянию.

По данным PCA параметр a во всех исследуемых сплавах после РКУП не изменяется, что свидетельствует об отсутствии признаков образования твердого раствора. Повышение содержания Fe, и соответственно объемной доли наноразмерных частиц Al_2Fe , сопровождается увеличением плотности дислокаций с $1,1 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$ в УМЗ сплаве Al-0,5Fe, до $2,7 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$ – в сплаве Al-2,5Fe.

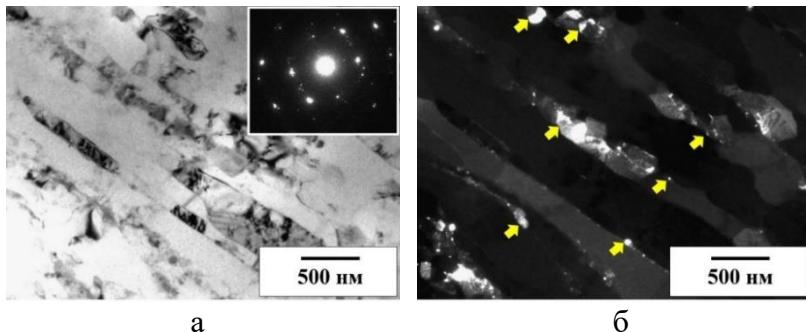


Рисунок 7 – Микроструктура сплава Al-1,7Fe после РКУП и ХП в продольном сечении (ПЭМ): а – светлопольное изображение, б – темнопольное изображение, с указанием частиц фазы Al_2Fe стрелками

наноразмерных частиц после РКУП и ХП в исследуемых сплавах заметно не изменяется (в сплаве Al-0,5Fe составляет 70 ± 10 нм, в Al-1,7Fe 60 ± 30 нм, в Al-2,5Fe 65 ± 15 нм). Однако частицы, как и в сплавах, полученных традиционным литьем, образуют компактные скопления, ориентированные в направлении ХП.

По данным РСА, в результате дополнительной ХП, плотность дислокаций повышается до $1,2\times10^{13}$ м⁻² и $4,2\times10^{13}$ м⁻² для сплавов Al-0,5Fe и Al-2,5Fe соответственно. Изменения параметра a отсутствуют, что указывает на отсутствие признаков образования твердого раствора железа в алюминии в результате двухэтапной ДО.

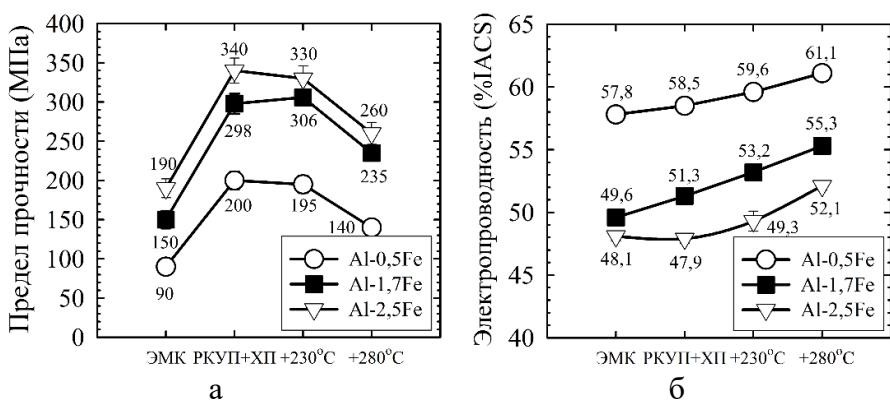


Рисунок 8 – Изменение свойств сплавов Al-Fe в зависимости от режимов обработки:

а – предел прочности на растяжение, б – электропроводность концентрации железа приводит к уменьшению электропроводности, более выраженному, чем в сплавах, полученных традиционным литьем. В исходном состоянии содержание железа не существенно влияет на пластичность. РКУП в исследуемых сплавах приводит к увеличению предела прочности (до 156 МПа в сплаве Al-0,5Fe, до 268 МПа в сплаве Al-1,7Fe, до 258 МПа в сплаве Al-2,5Fe). Электропроводность сплавов не претерпевает заметных изменений. После РКУП относительное удлинение до разрушения УМЗ сплавов составляет от 11,7 до 19,8%.

ХП, осуществляемая после РКУП, продолжает тенденцию упрочнения сплавов – предел прочности сплава Al-0,5Fe увеличивается до 200 МПа, сплава Al-1,7Fe – до 298 МПа, а сплава Al-2,5Fe до 340 МПа (Рисунок 8). При этом электропроводность исследуемых сплавов также увеличилась приблизительно на 2% IACS, что объясняется разрушением непрерывной сетки образованной эвтектикой в результате ХП. Относительное удлинение до разрушения заметно ниже, чем в исходном состоянии, но остается на достаточно высоком уровне – не менее 15%.

УМЗ структура сплавов Al-Fe после РКУП-К и ХВ подобна микроструктуре,

На Рисунке 7, на примере образца Al-1,7Fe, представлена типичная микроструктура, сформированная после РКУП и ХП. ХП приводит к удлинению зерен в направлении деформации, их длина увеличивается до 2 мкм, а ширина уменьшается до 335 ± 15 нм в сплаве Al-0,5Fe, до 290 ± 20 нм в сплаве Al-1,7Fe, до 195 ± 10 нм в сплаве Al-2,5Fe. Средний размер

Сплавы Al-Fe, полученные литьем в ЭМК, характеризуются сравнительно невысокими значениями прочности (Рисунок 8), имеющими тенденцию к росту с увеличением концентрации железа в сплаве. Изменение электропроводности демонстрирует обратное поведение – увеличение концентрации железа приводит к уменьшению электропроводности, более выраженному, чем в сплавах, полученных традиционным литьем. В исходном состоянии содержание железа не существенно влияет на пластичность. РКУП в исследуемых сплавах приводит к увеличению предела прочности (до 156 МПа в сплаве Al-0,5Fe, до 268 МПа в сплаве Al-1,7Fe, до 258 МПа в сплаве Al-2,5Fe). Электропроводность сплавов не претерпевает заметных изменений. После РКУП относительное удлинение до разрушения УМЗ сплавов составляет от 11,7 до 19,8%.

ХП, осуществляемая после РКУП, продолжает тенденцию упрочнения сплавов – предел прочности сплава Al-0,5Fe увеличивается до 200 МПа, сплава Al-1,7Fe – до 298 МПа, а сплава Al-2,5Fe до 340 МПа (Рисунок 8). При этом электропроводность исследуемых сплавов также увеличилась приблизительно на 2% IACS, что объясняется разрушением непрерывной сетки образованной эвтектикой в результате ХП. Относительное удлинение до разрушения заметно ниже, чем в исходном состоянии, но остается на достаточно высоком уровне – не менее 15%.

сформированной в результате обработки РКУП и ХП. ХВ образцов сплавов Al-0,5Fe и Al-1,7Fe, предварительно подвергнутых обработке методом РКУП-К, повысило прочностные характеристики до 239 и 310 МПа соответственно (Рисунок 9).

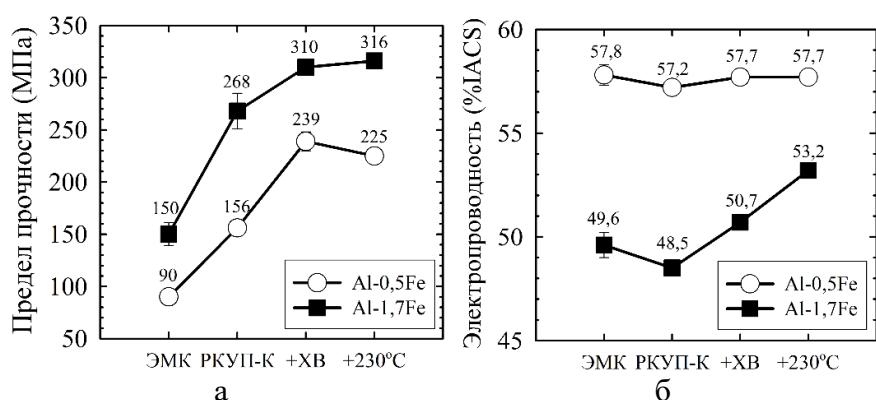


Рисунок 9 – Изменение свойств сплавов системы Al-Fe после РКУП-К, ХВ и отжига:
а – предел прочности на растяжение, б – электропроводность

Отжиг при температуре 230 °C приводит к разупрочнению менее чем на 10% тонких пластин и проволоки из наноструктурированных сплавов, полученных после ХП (Рисунок 8) или ХВ (Рисунок 9), вызывая увеличение электропроводности на 1-2% IACS. Отжиг при 280 °C приводит к разупрочнению до недопустимого уровня для термостойких проводников, что связано с увеличением размера (ширины) зерен (Рисунок 10), как это ранее было отмечено для УМЗ сплавов, полученных традиционными методами литья.

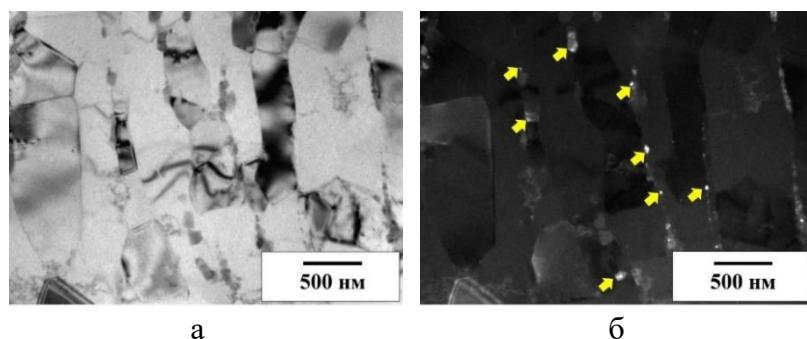


Рисунок 10 – Микроструктура сплава Al-1,7Fe после РКУП, ХП и отжига 280 °C, 1 ч., продольное сечение (ПЭМ): а – светлопольное изображение, б – темнопольное изображение, с указанием стрелками частиц фазы Al₂Fe

60 ± 15 нм.

Сопоставление уровня термостойкости УМЗ сплавов, полученных традиционным литьем и УМЗ сплавов, полученных литьем в ЭМК, показало, что согласно требованиям стандартов ГОСТ Р МЭК 62004-2014 и IEC 62641:2023, их термическая стабильность сопоставима с проводниками сплавами системы Al-Zr и Al-P3M. Однако, тонкие пластины и проволока, выполненные из УМЗ сплавов Al-0,5Fe и Al-1,7Fe полученных литьем в ЭМК, демонстрируют более высокие прочностные характеристики как до, так и после отжига (см. Рисунки 4, 8 и 9), что свидетельствует о том, что наноразмерные частицы обеспечивают заметно большую стабильность физико-механических свойств при повышенных температурах.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния легирования малой добавкой меди (0,3 вес.%) на микроструктуру, физико-механические свойства и их термическую стабильность сплава Al-0,5Fe-0,3Cu – аналога по химическому составу

Относительное удлинение до разрыва проволоки, выполненной из обоих сплавов, составляет 3-5%, что является весьма хорошим показателем для токопроводящих жил из проводниковых сплавов. Электропроводность сплавов Al-0,5Fe и Al-1,7Fe после ХВ также претерпевает некоторое увеличение до 57,7 и до 50,7% IACS.

В результате отжига при 280 °C (Рисунок 10) зерна остаются вытянутыми в направлении ХП или ХВ. Их ширина увеличивается до 595 ± 25 нм в сплаве Al-0,5Fe, до 575 ± 25 нм в сплаве Al-1,7Fe и до 410 ± 20 нм в сплаве Al-2,5Fe. В результате отжига не происходит изменения размера интерметаллидных частиц. Их средний размер составляет в сплавах: Al-0,5Fe – 60 ± 10 нм, Al-1,7Fe – 50 ± 20 нм, Al-2,5Fe –

сплаву 8030, полученного методом литья ЭМК и подвергнутого двухэтапной ДО, включающей РКУП или РКУП-К, а на втором этапе ХП или ХВ.

Микроструктура литого сплава Al-0,5Fe-0,3Cu качественно подобна микроструктуре сплава Al-0,5Fe, полученного литьем в ЭМК и представляет собой ячейки, границы которых сформированы сеткой интерметаллидов. Средний размер дендритных ячеек составляет $5,7 \pm 0,9$ мкм. Интерметаллидная фаза имеет форму тонких ламелей, толщина которых составляет 120 ± 30 нм, а длина до нескольких микрон. РСА показал, что в сплаве в исходном состоянии присутствуют частицы метастабильной фазы Al_2Fe , обнаруженной ранее в сплавах системы Al-Fe, полученных литьем в ЭМК. Кроме того, по результатам энергодисперсионного анализа в микроструктуре сплава обнаружено незначительное количество тройной фазы, близкой по составу $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$.

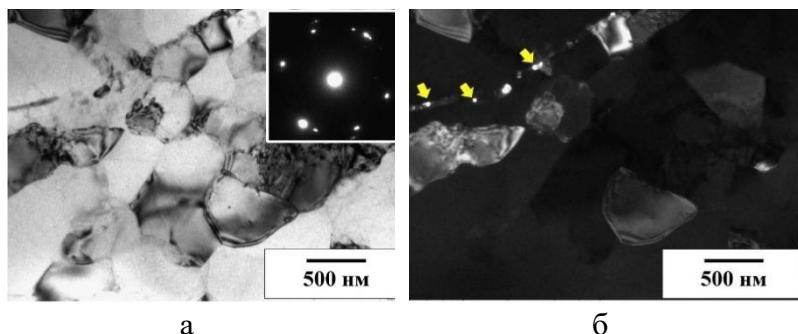


Рисунок 11 – Микроструктура сплава Al-0,5Fe-0,3Cu в состоянии после РКУП (ПЭМ), а – светлопольное изображение, б – темнопольное изображение

РСА показал, что после обработки РКУП в сплаве наблюдается уменьшение параметра a (до $4,0498 \text{ \AA}$), по сравнению с исходным литым ($a \sim 4,0522 \text{ \AA}$), что свидетельствует о растворении некоторого количества меди в алюминии в результате ДО.

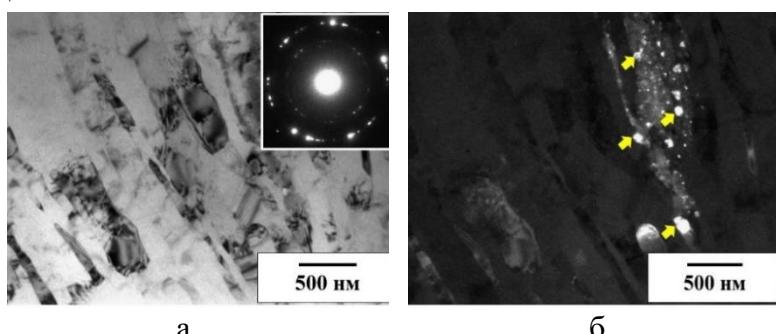


Рисунок 12 – Микроструктура сплава Al-0,5Fe-0,3Cu после РКУП и последующей ХП со степенью обжатия 85%, продольное сечение (ПЭМ): а – светлопольное изображение, б – темнопольное изображение

(Рисунок 12 б).

После РКУП-К образцы сплава подвергали ХВ для получения проволоки. Средняя ширина зерна составила 200 ± 50 нм, а длина около 2 мкм. Интерметаллидные частицы в результате такой ДО фрагментировались до наноразмеров (средний размер составил 60 ± 10 нм), образуя строчечные скопления, как и после ХП.

Формированиеnanoструктурированных состояний на первом этапе ДО приводит к существенному (в 2 раза) повышению прочностных характеристик, которое сопровождается заметным уменьшением относительного удлинения (до 13,7%) и снижением электропроводности (с 56,1 до 54,8% IACS), которое обусловлено растворением меди в алюминии в результате РКУП (Рисунок 13).

В результате дополнительной ХП равноосные зерна трансформируются в волокна в направлении деформации. Их длина достигает 1,5 мкм, а ширина 220 ± 28 нм (Рисунок 12). В процессе ХП, как и в случае сплавов, не содержащих медь, отмечается дополнительная фрагментация наноразмерных частиц Al_2Fe и формирование ими компактных скоплений в виде строчек

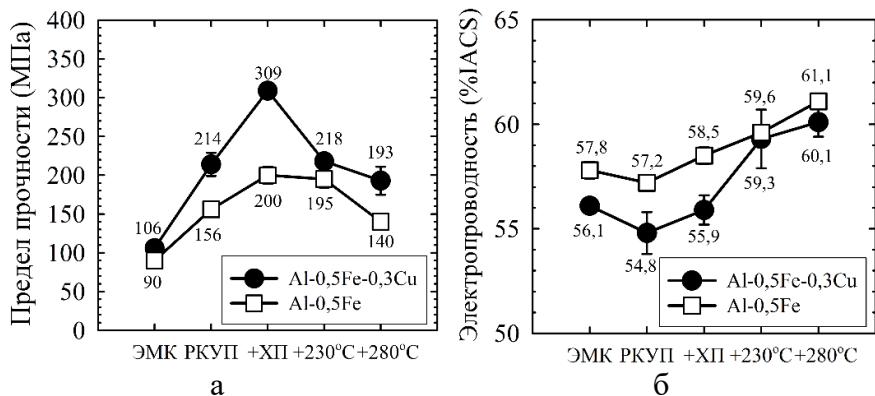
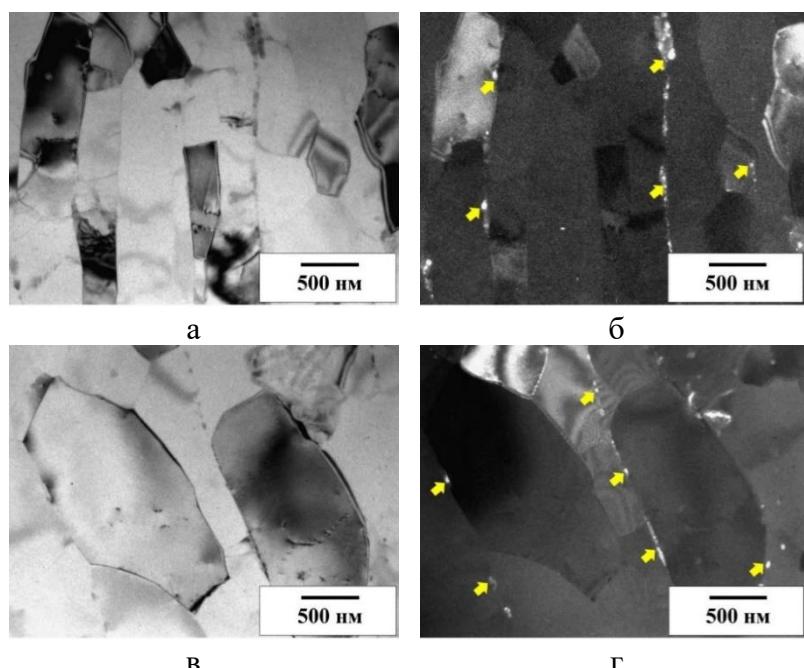


Рисунок 13 – Эволюция свойств сплавов Al-0,5Fe-0,3Cu и Al-0,5Fe после двухэтапной ДО, включающей РКУП, ХП, а также отжига при 230 или 280 °C:
а – предел прочности на растяжение, б – электропроводность

легирование медью (до 0,3 вес.-%), в совокупности с формированием структуры содержащей наноразмерные частицы фазы Al_2Fe , вызывает значительно большее упрочнение по сравнению с наноструктурированным сплавом Al-0,5Fe после аналогичной обработки. В сплаве Al-0,5Fe-0,3Cu двухэтапная ДО приводит к двухкратному повышению прочности, снижению относительного удлинения до разрушения, а также электропроводимости (Рисунок 13).

Физико-механические свойства тонких пластин и проволоки из сплава Al-0,5Fe-0,3Cu, полученной литьем в ЭМК и последующей двухэтапной ДО, также, как и аналогичные образцы сплава Al-1,7Fe, демонстрируют соотношение «прочность-электропроводность» на уровне высокопрочных проводников, выполненных из сплавов системы Al-Mg-Si, полученных по серийной технологии, заметно превосходя проводники из сплава Al-0,5Fe без меди, полученного ЭМК после двухэтапной ДО, выполненной по аналогичным режимам.



отжига уже при 230 °C (Рисунок 14 а, б) из-за заметного укрупнения зерен – их средняя ширина увеличивается до 700 ± 35 нм. Интерметаллидные частицы фазы Al_2Fe нанометрических размеров выступают в роли барьеров, сдерживающих миграцию границ зерен, формируя зернограницевые прослойки (Рисунок 14 б). Отжиг при 280 °C приводит к еще большей деградации микроструктуры. Средняя ширина ультрамелких зерен достигает 900 нм (Рисунок 14 в, г).

Последующая ХП повышает предел прочности сплава до 309 МПа, что превышает этот показатель исходного образца почти в 3 раза и не оказывает существенное влияния на относительное удлинение образцов, при этом электропроводность восстанавливается до уровня исходного образца. Таким образом, дополнительное, относительно небольшое

отличие от наноструктурированных сплавов Al-Fe без меди, сплав Al-0,5Fe-0,3Cu существенно разупрочняется в результате

В отличии от сплавов Al-Fe без меди, сплав Al-0,5Fe-0,3Cu существенно разупрочняется в результате

Вклады микроструктурных механизмов на физико-механические свойства исследуемых сплавов оценивались согласно аддитивной модели, где предел текучести сплава и его электросопротивление складываются из отдельного влияния каждого параметра микроструктуры.

Общее упрочнение рассчитывается по формуле: $\sigma_{0,2} = \sigma_0 + \sigma_{\text{ГЗ}} + \sigma_{\text{TB}} + \sigma_{\text{op}} + \sigma_d$, где σ_0 – напряжение сдвига (Пайерлса-Набарро); $\sigma_{\text{ГЗ}}$ – упрочнение за счет границ зерен (ГЗ); σ_{TB} – упрочнение за счет твердого раствора; σ_{op} – упрочнение за счет присутствия частиц интерметаллидных фаз (Орована); σ_d – упрочнение за счет дислокаций.

Полное электросопротивление проводника рассчитывается по правилу Маттиссена: $\rho = \rho_{Al} + \rho_{\text{вак}} + \rho_d + \rho_{\text{ГЗ}} + \rho_{\text{ч}} + \rho_{\text{TB}}$, где ρ_{Al} – удельное сопротивление чистого алюминия; $\rho_{\text{вак}}$ – вклад от вакансий; ρ_d – вклад от дислокаций; $\rho_{\text{ГЗ}}$ – вклад от ГЗ; $\rho_{\text{ч}}$ – вклад от частиц алюминидов железа; ρ_{TB} – вклад от твердого раствора.

Оценка вкладов на примере наноструктурированных сплавов Al-0,5Fe, Al-0,5Fe-0,3Cu и Al-1,7Fe, полученных литьем в ЭМК после ИПД методом РКУП, показала, что вклад наноразмерных частиц фазы Al_2Fe в общее упрочнения составляет 25, 27 и 35% соответственно. На Рисунке 15 а изображены диаграммы распределения вкладов на примере сплава Al-0,5Fe.

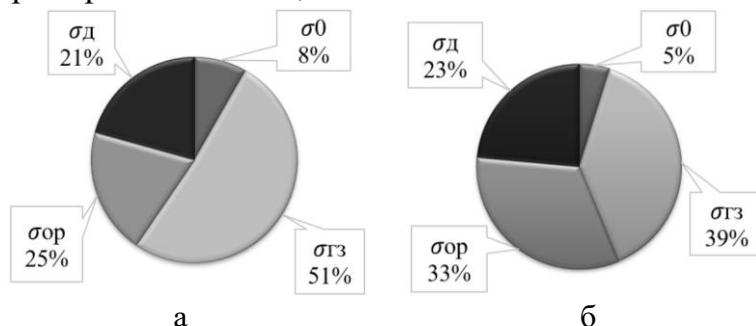


Рисунок 15 – Диаграммы распределения вкладов микроструктурных механизмов в прочность сплава Al-0,5Fe, полученных литьем в ЭМК после ДО: а – РКУП, б – РКУП+ХП

составляет 33 и 38% соответственно.

В отсутствие влияния твердого раствора в сплавах системы Al-Fe на удельное электрическое сопротивление, основной вклад на его величину оказывает объемная доля интерметаллидных частиц, а также, в меньшей степени размеры и морфология ультрамелких зерен и частиц. Изменение геометрических размеров образцов УМЗ сплавов в результате ХП или ХВ приводит к перераспределению частиц, их перестройке и изменению межчастичных расстояний. Оценка возможных механизмов вкладов на электрическое сопротивление УМЗ сплавов показало, что вклад ГЗ на электросопротивление составил около 18 и 31%. Вклад наноразмерных частиц фазы Al_2Fe заметно менее выражен и достигает 3 и 8% для сплавов Al-0,5Fe и Al-2,5Fe соответственно.

Анализ микроструктурных процессов, количественная оценка их вкладов на свойства и физические характеристики материала показали, что присутствие в УМЗ структуре сплавов системы Al-Fe, полученных по технологии литья в ЭМК и подвергнутых двухэтапной ДО, наноразмерных частиц фазы Al_2Fe обеспечивают значительное увеличение их прочности без существенной потери электропроводности, повышая термическую стабильность свойств до уровня термостойких проводниковых сплавов системы Al-Zr.

На Рисунке 16 обобщены полученные в работе экспериментальные данные. Микроструктуры, сформированные в ЭМК сплаве Al-0,5Fe после РКУП и ХП или ХВ повысили механическую прочность до уровня, превышающего прочность

анализ возможных микроструктурных механизмов вкладов в упрочнение сплавов Al-Fe, наноструктурированных в результате двухэтапной ДО методом РКУП и ХП, на примере сплавов Al-0,5Fe и Al-2,5Fe показал, что вклад ГЗ в упрочнение составляет 39 и 41%, а на втором месте по значимости в упрочнение – вклад от наноразмерных частиц, который

коммерческих сплавов серии 8000 и термостойких сплавов системы Al-Zr типа AT1 и AT2.

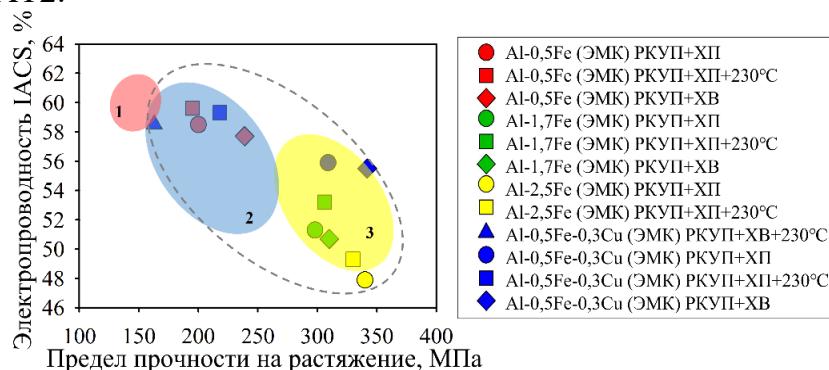


Рисунок 16 – Изменение свойств исследуемых сплавов системы Al-Fe в сопоставлении с коммерчески используемыми сплавами: С.Р. Al (1000 серия) [ГОСТ 13843-2019], Al-Fe (8000 серия) [ГОСТ 58019-2017]; 2 – Al-Zr (AT1-AT4) [IEC 62004:2007, МЭК 62004:2007]; 3 – Al-Mg-Si (6000 серия) [EN 50183:2002]

такая как проволока и токопроводящие шины, изготовленная из сплава Al-1,7Fe с УМЗ структурой, имеет схожие и даже превосходит по показателям соотношения «предел прочности – электропроводность» промышленных сплавов системы Al-Mg-Si, и более чем в 1,5 раза превосходят их по уровню термостойкости, показывая ее на уровне сплавов системы Al-Zr типа AT1 и AT2.

По сочетанию физико-механических свойств, проволока из УМЗ сплава Al-0,5Fe-0,3Cu превосходит проводники, получаемые из промышленных термоупрочняемых сплавов системы Al-Mg-Si, которые наиболее широко используются для изготовления проводов воздушных линий электропередачи, кабелей и самонесущих изолированных проводов. По физико-механическим свойствам УМЗ сплав Al-0,5Fe-0,3Cu после отжига 230°C превосходит промышленный сплав 8030, а также УМЗ сплав Al-0,5Fe, не содержащий медь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенных исследований установлено влияние методов литья, содержания железа и деформационной обработки, включая интенсивную пластическую деформацию, на улучшение физико-механических свойств и термическую стабильность сплавов системы Al-Fe, предназначенных для использования в качестве проводниковых материалов в электротехнике.

1. Установлено, что при использовании традиционных методов литья в кокиль и литья, совмещенного с прокаткой, в сплавах Al-Fe образуются преимущественно интерметаллидные частицы стабильной фазы Al_6Fe . При непрерывном литье в ЭМК в сплавах впервые установлено образование частиц метастабильной фазы Al_2Fe , имеющие близкие к нанометрическому диапазону размеры (90 ± 20 нм), входящей в состав эвтектики $(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Fe}$.

2. Установлено, что ИПД, реализуемая методами РКУП или непрерывного РКУП-К при комнатной температуре позволяет сформировать в сплавах Al-0,5Fe, Al-0,5Fe-0,3Cu, Al-1,7Fe и Al-2,5Fe, полученных литьем в ЭМК, наноструктурированные состояния, характеризующиеся ультрамелким размером зерна алюминиевой матрицы и частицами фазы Al_2Fe нанометрических размеров (70 ± 10 нм).

3. Установлено, что наноструктурирование сплавов Al-0,5Fe, Al-0,5Fe-0,3Cu и Al-1,7Fe, полученных двухэтапной обработкой, включающей РКУП или РКУП-К с последующей ХП или ХВ – позволяет повысить предел прочности от 239 до 310 МПа,

Наноструктурированный сплав с содержанием Fe 1,7 вес.%, полученный в результате такой же обработки, по комплексу физико-механических свойств, может быть рассмотрен в качестве недорогого перспективного материала для замены высокопрочных проводников таких марок как 6101, 6201 и АВЕ из термически упрочняемых сплавов системы Al-Mg-Si. Проводниковая продукция,

сохраняя высокую электропроводность от 51,3 до 58,5% IACS соответственно, а также термостойкость эквивалентную длительной эксплуатации в течение теоретически неограниченного времени при температуре 150 °С. Показано, что вклад наноразмерных частиц (70 ± 10 нм) фазы Al₂Fe в упрочнение сплавов Al-0,5Fe, Al-0,5Fe-0,3Cu и Al-1,7Fe является определяющим, составляя 25, 27 и 35 % соответственно.

4. Экспериментально установлено рациональное содержание железа (от 1,0 до 2,2 вес.%) в сплавах системы Al-Fe с наноразмерными частицами (70 ± 10 нм) фазы Al₂Fe, полученных методом литья в ЭМК и режимы их деформационной обработки, обеспечивающие сочетание «прочность-электропроводность» на уровне высокопрочных проводниковых сплавов Al-Mg-Si при термостойкости, аналогичной проводникам, выполненным из сплавов систем Al-Zr и Al-PЗМ.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Научные публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и международные реферативные базы данных и систем цитирования Web of Science, Scopus:

1. **Жукова О.О. (Байкеева О.О.)**, Медведев А.Е., Медведев Е.Б., Мурашкин М.Ю. Влияние содержания железа на прочность и электропроводность сплавов системы Al-Fe, подвергнутых ИПД / Вестник УГАТУ. – 2021. – Т. 25. – № 2 (92). – С. 3-9. (К2, ВАК).

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. (К1 = Q1).

3. 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. (К2, ВАК 2.6.6.).

4. Medvedev A., **Zhukova O.**, Kazykhanov V., Shaikhulova A., Motkov M., Timofeev V., Enikeev N., Murashkin M. Unique properties of the Al-0,5Fe-0,3Cu alloy, obtained by casting into an electromagnetic crystallizer, after equal-channel angular pressing and cold drawing / Materials Physics and Mechanics. – 2024. – № 52(3). – P. 58–72. (К2, ВАК).

5. 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. (К2, ВАК 2.6.6.).

6. Medvedev A., **Zhukova O.**, Kazykhanov V., Shaikhulova A., Motkov M., Timofeev V., Enikeev N., Murashkin M. Influence of Cu alloying on the microstructure and properties of the Al-Fe alloy, produced by electromagnetic casting and subjected to equal-channel angular pressing / Physics of Metals and Metallography. – 2024. – P. 1-9. (К1, ВАК).

7. 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. (К1 = Q1).

Патент:

8. Патент № 2815427 C1 Российская Федерация, МПК B22D 21/04, C22F 1/04, H01B 1/02. Способ получения проводника из сплава системы Al-Fe: № 2022132494: заявл. 12.12.2022: опубл. 14.03.2024 / М.Ю. Мурашкин, А.Е. Медведев, **О.О. Жукова**, И.В. Смирнов.

Публикации в трудах научных конференций:

9. **Жукова О.О. (Байкеева О.О.)**, Медведев А.Е., Медведев Е.Б., Мурашкин М.Ю. Влияние содержания железа на свойства сплавов системы Al-Fe обработанных

методом РКУП / Сборник трудов конференции V Международная научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения». Уфа: УГАТУ. – 2021. – С. 11-17.

10. Жукова О.О. (Байкеева О.О.), Медведев А.Е., Медведев Е.Б. Влияние содержания железа на свойства сплавов системы Al-Fe, обработанных методом РКУП / Сборник трудов XIX Всероссийской конференции – конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования». Санкт-Петербург. – 2021. – С. 107-110.

11. Medvedev A.E., Zhukova O.O. (Baykeeva O.O.), Medvedev E.V., Murashkin M.Yu. Influence of iron content on properties of Al-Fe system alloys after ECAP / AIP Conference Proceedings 2402. – 2021. – Р. 1-5.

12. Жукова О.О., Медведев А.Е., Казыханов В.У., Лелеко А.В., Мурашкин М.Ю. Влияние деформационно-термической обработки, включающей ИПД на микроструктуру и физико-механические свойства сплавов Al-Fe, полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор / Сборник тезисов девятой международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов». НИТУ «МИСиС». Москва. – 2021. – С. 70.

13. Медведев А.Е., Жукова О.О., Шайхулова А.Ф., Тимофеев В.Н., Еникеев Н.А., Мурашкин М.Ю. Влияние деформации и отжига на фазовый состав сплавов системы Al-Fe, полученных методом литья в электромагнитный кристаллизатор / Материалы всероссийской научной конференции с международным участием «IV Байкальский Материаловедческий Форум». Улан-Удэ, оз. Байкал. – 2022. – С. 538-539.

14. Медведев А.Е., Жукова О.О., Шайхулова А.Ф., Мурашкин М.Ю. Влияние Cu на микроструктуру и свойства сплавов системы Al-Fe, полученных методом литья в электромагнитный кристаллизатор / Сборник материалов XI Международной школы «Физическое материаловедение». Тольятти. Изд-во ТГУ. – 2023. – С. 231.

15. Медведев А.Е., Жукова О.О., Шайхулова А.Ф., Мурашкин М.Ю. Уникальные свойства сплава Al-0,5Fe-0,3Cu, полученного литьем в электромагнитный кристаллизатор с последующим равноканальным угловым прессованием и холодным волочением / Сборник материалов третьей Международной школы-конференции молодых ученых «Кайбышевские чтения». Уфа. – 2023. – С. 170.

16. Medvedev A.E., Zhukova O.O., Shaikhulova A.F., Timofeev V. N., Murashkin M.Yu. Effect of Small Copper Additions to the Al-Fe Wires, Produced by Electromagnetic Casting / AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3102. – № 1. – Р. 020019.

17. Медведев А.Е., Жукова О.О., Мурашкин М.Ю. Влияние деформационной обработки на микроструктуру и свойства сплава Al-0,5Fe-0,3Cu, полученного литьем в электромагнитный кристаллизатор – Сборник тезисов LXVII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Екатеринбург. – 2024. – С. 341.

18. Жукова О.О., Медведев А.Е., Мурашкин М.Ю. Микроструктура и свойства сплавов Al-Fe, полученных литьем в ЭМК, после деформационной обработки / Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах. Всероссийская конференция с международным участием. Уфа. – 2024. – С. 77.

19. Медведев А.Е., Жукова О.О., Мурашкин М.Ю. Получение термостойкой проволоки из сплавов системы Al-Fe с использованием двухэтапной деформационной обработки / Международная конференция «UUST Nanomaterials Days». Уфа. – 2024. – С. 40-41.

Соискатель



Жукова О.О.

ЖУКОВА Ольга Олеговна

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И
ТЕРМОСТОЙКОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ
Al-Fe ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Специальность:
2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук