

ОТЗЫВ

официального оппонента Маркушева Михаила Вячеславовича на диссертационную работу Жуковой Ольги Олеговны на тему «Механические свойства, электропроводность и термостойкость наноструктурированных сплавов системы Al-Fe для использования в электротехнике», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.6. «Нанотехнологии и наноматериалы».

Актуальность темы исследования

Развитие промышленного производства неуклонно сопровождается ростом потребления электроэнергии. Системы электропитания, ключевым компонентом которых являются проводники, постоянно требуют совершенствования с целью повышения эффективности доставки энергии потребителю. Благодаря сочетанию сравнительно низкой себестоимости производства, высокой доле вторичного использования, достаточной удельной прочности, хорошей электропроводности и стойкости к атмосферной коррозии, объем алюминиевых проводников при использовании в электрических сетях, остается высоким и имеет ряд неспоримых преимуществ по сравнению, например, с наиболее распространёнными медными проводниками. В связи с этим исследования, направленные на улучшение потребительских качеств алюминиевых проводников, нацеленные, прежде всего, на разработку новых технологий производства таковых с улучшенными служебными свойствами за счет контроля их структуры и фазового состава, являются несомненно актуальными. В этом контексте тема и цели диссертационной работы Жуковой О.О., в основе которой лежат материаловедческие аспекты новых технологических подходов к повышению эффективности получения алюминиевых проводников из дешевых сплавов системы Al-Fe, безусловно, также актуальны.

Общая характеристика работы

Представленная диссертация изложена на 168 страницах, включает 62 рисунка и 42 таблицы. Работа состоит из введения, пяти глав, каждая из которых завершается выводами, общего заключения и списка литературы из 226 источников.

Во введении обсуждена важность и актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованы достоверность и апробация результатов, сведения о личном вкладе автора.

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме работы. В нем приведена информация о современных проводниковых сплавах на основе алюминия, их химическом составе, физико-механических свойствах и условиях эксплуатации, о методах их производства. Кратко описаны современные подходы к структурированию алюминиевых сплавов, в том числе при использовании

ВХОД. №	4658-13
« 01 »	12 2022 г.

прогрессивных методов литья и так называемой «интенсивной» пластической деформации (ИПД). Обсужден потенциал и перспективы использования в качестве проводников сплавов системы Al-Fe.

Во второй главе приведена информация о материалах исследования, включая способы получения литых заготовок, а также методы и режимы последующей их термомеханической обработки (ТМО). В частности указано, что для сопоставления часть сплавов была получена литьем в кокиль (ЛК) и совмещением литья с прокаткой (СЛП). Другую часть сплавов получали непрерывным литьем в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). Последующую деформацию реализовали равноканальным угловым прессованием (РКУП) по классической схеме без противодействия, а также по схеме конформ (РКУП-К). Затем прессованные заготовки подвергли холодной прокатке (ХП) или волочению (ХВ). Указано, что строение литых и деформированных заготовок изучали с использованием сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа. Механические свойства в условиях статического растяжения, параметры электрической проводимости и термостойкости сплавов оценивали в соответствии с государственными и отраслевыми стандартами.

В третьей главе представлены результаты аттестации структуры, фазового состава, термостойкости, механических свойств и электропроводности сплавов с содержанием железа 0,5 (сплав 8176), 1,7 и 3,4 % вес., полученных в промышленных условиях методами ЛК и СЛП, а также после РКУП и последующей ХП.

В четвертой главе представлены аналогичные результаты исследований структуры и свойств бинарных сплавов с содержанием Fe 0,5, 1,7 и 2,5 %, полученных ЭМК литьем, и ТМО, реализовавшей сочетание РКУП, РКУП-К, ХП и ХВ.

В пятой главе приведены результаты оценки структуры и свойств сплава Al-0,5Fe-0,3Cu, полученного литьем в ЭМК, и последующей ТМО, включавшей РКУП, РКУП-К, ХП или ХВ. На их основе проведен анализ эффекта введения меди в бинарный сплав на структуру и свойства литой и деформированных заготовок. Сопоставлены уровни свойств сплава с медью и серийных проводников из алюминиевых сплавов различных систем.

По результатам исследования сделаны общие выводы, которые представлены в разделе **Заключение**.

Формулировки научной новизны, теоретической и практической значимости, и достоверности результатов и выводов предлагаю в следующем виде:

Научная новизна:

1. Установлено, что в слитках диаметром 11 мм из Al-Fe сплавов с содержанием железа от 0,5 до 2,5 вес. %, полученных непрерывным литьем в ЭМК, формируется структура, состоящая из алюминиевой матрицы и эвтектики с наноразмерными (90 ± 20 нм) частицами метастабильной фазы Al_2Fe .
2. Деформация ЭМК литых сплавов Al-0,5Fe, Al-0,5Fe-0,3Cu, Al-1,7Fe и Al-

2,5Fe сочетанием методов РКУП или РКУП-К и ХП или ХВ придает им УМЗ строение матрицы со строчечным расположением наноразмерных (70 ± 10 нм) частиц Al_2Fe фазы, что повышает соотношение «прочность-термостойкость» проводников.

3. Добавка 0,3 % (вес.) меди в сплав Al-0,5Fe, ЭМК литье и последующая ТМО, основанная на двухэтапной холодной деформации, формирует в нем структурно-упрочненную матрицу с наноразмерными вторыми фазами, и обеспечивает увеличение предела его прочности в 1,5 раза по сравнению с аналогично обработанным и структурированным сплавом без меди.

4. Обработка, сочетающая непрерывное литье в ЭМК и последующую ИПД сплавов Al-Fe с содержанием железа от 1,0 до 2,2 вес. %, позволяет получать высокопрочные термостойкие электрические проводники сечением 3 мм² с пределом прочности до 310 МПа, электропроводностью до 58,5 % IACS и рабочими температурами до 150 °C.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая значимость работы заключается в том, что определен состав и количественные характеристики наноразмерных элементов структуры, наличие которых в сплавах системы Al-Fe обеспечивает достижение требуемого комплекса служебных свойств для применения в электротехнике.

Практическая значимость работы заключается в том, что для Al-Fe сплавов показано, что литье в ЭМК и последующая ИПД, реализованная различными методами, позволяет обеспечить сочетание их прочности (в диапазоне от 240 до 310 МПа), электропроводности (от 51,3 до 58,5% IACS) и термостойкости (температуру длительной эксплуатации до 150 °C) за счет контроля содержания железа, малых добавок меди и наноструктурирования. Наноструктурированные сплавы с железом могут рассматриваться в качестве альтернативы промышленным электротехническим сплавам систем Al-Mg-Si и Al-PЗМ/ПМ. Разработан способ получения проводника круглого и прямоугольного сечения из сплава Al-1,7Fe (вес. %), включающий непрерывное литье в ЭМК и двухэтапную деформацию включая ИПД.

Достоверность результатов и выводов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обусловлены широким спектром экспериментальных данных и их соответствием известным теоретическим представлениям. Достоверность экспериментальных исследований обеспечена использованием комплекса независимых современных методов анализа, сертифицированных и аттестованных приборов и измерительных устройств, а также программных продуктов и статистической обработкой результатов.

По материалам, представленным на защиту, опубликовано 19 работ. Из них 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 4 цитируются в

международные базах Web of Science и Scopus и включены в «Белый список», 11 в сборниках трудов конференций, и 1 патент РФ.

Замечания по диссертационной работе:

Замечания по форме и содержанию

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. (См. выше предложенный мной вариант формулировок для обсуждения советом при подготовке заключения по итогам защиты).

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, опiski 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.

Замечания по результатам

1. 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.

2. 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.

3. 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?

4. 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.

Сделанные замечания и суждения не снижают научной и практической значимости и общую оценку диссертационной работы, выполненной на высоком научно-техническом уровне. Автореферат по своей структуре и содержанию полностью соответствует диссертации. Диссертация и автореферат оформлены в согласии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Опубликованные работы соответствуют тематике проведённого исследования и данным, представленным в диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Жуковой Ольги Олеговны представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технические решения, обеспечивающие получение проводников из сплавов системы Al-Fe с механическими свойствами, электропроводностью и термостойкостью, позволяющими рассматривать их в качестве альтернативы традиционно используемым сплавам систем легирования электротехнического назначения.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённых Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Жукова Ольга Олеговна,

заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Официальный оппонент:

доктор технических наук

Маркушев Михаил Вячеславович

главный научный сотрудник,

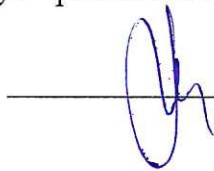
заведующий лабораторией

«Материаловедение и технологии лёгких сплавов»

Федерального государственного

бюджетного учреждения науки

Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук



Маркушев Михаил Вячеславович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (ФГБУН ИПСМ РАН)

Докторская диссертация защищена

по специальности 05.02.01- Материаловедение (Машиностроение)

Адрес места основной работы: 450001 Республика Башкортостан, г. Уфа,

ул. Степана Халтурина, 39

Рабочий телефон: +7 (347) 282-38-56

Адрес эл. почты: mvmark@imsp.ru

Дата составления отзыва «27» ноября 2025 года

Доктор Маркушев М.В. уполномочен
наглашени ОИ *Сосудина*

