

«Утверждаю»

Протектор по научной и инновационной деятельности

Федеральное государственное образовательное

учреждение высшего образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»,

д.т.н., проф. Коновалов С.В.

«12» мая 2025 г.



ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»

на диссертационную работу Черкасова Станислава Олеговича

«Обоснование состава и режима деформационно-термической обработки наноструктурных проводниковых сплавов системы Al-Cu-Mn-(Zr), полученных методом литья в электромагнитный кристаллизатор»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертации

В современных условиях развития промышленности наблюдается растущий спрос на легкие, прочные и термостойкие проводниковые материалы, способные заменить медные сплавы в электроэнергетике, аэрокосмической и автомобильной отраслях. Основная проблема заключается в низкой прочности традиционных алюминиевых проводниковых сплавов, что требует либо увеличения их поперечного сечения, либо разработки новых материалов с улучшенными характеристиками.

В данной работе рассматриваются наноструктурные сплавы системы Al-Cu-Mn-(Zr), полученные методом литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). Данный метод обеспечивает формирование равномерной структуры с улучшенными физико-механическими свойствами. Применение сплавов с дисперсоидным упрочнением, в частности с фазами $Al_{20}Cu_2Mn_3$ и Al_3Zr , способствует сохранению высокой прочности при повышенных температурах без значительного ухудшения электропроводности.

Развитие технологии литья в ЭМК в сочетании с деформационно-термической обработкой (ДТО) открывает новые перспективы для производства эффективных проводниковых материалов, отвечающих современным требованиям надежности и долговечности. В связи с этим диссертационная работа является актуальной и востребованной как с научной, так и с практической точки зрения.

Основное внимание в данной работе уделено важной задаче оптимизации химического состава и режима ДТО, обеспечивающих благоприятный фазовый состав с целью достижения требуемого комплекса физико-механических свойств. Для решения данной задачи Черкасовым С.О. было применено компьютерное моделирование системы Al-Cu-Mn-(Zr) с использованием программного пакета Thermo-Calc, позволившим выбрать как химические композиции, так и режимы ДТО полуфабриката. Для экспериментального исследования физико-механических свойств и структуры сплавов выбраны надежные и опробованные методики с использованием современного измерительного оборудования. Исследования структуры сплавов проводились с использованием световой, сканирующей и просвечивающей микроскопии, что позволило проследить закономерности образования структурных составляющих и оценить химический состав отдельных фаз локально.

Полученные в диссертационной работе результаты и сделанные по ним выводы имеют большое практическое значение для технологии производства проводниковых алюминиевых сплавов, как системы Al-Cu-Mn-(Zr), так и для разработки других систем применительно к литью в ЭМК.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы Черкасова Станислава Олеговича заключается в том, что автор, опираясь на полученные экспериментальные результаты, выявил закономерности, определяющие влияние состава и параметров деформационно-термической обработки на фазовый состав, структуру и физические свойства наноструктурных проводниковых сплавов Al-Cu-Mn-(Zr), получаемых методом литья в ЭМК.

В частности, новизна полученных результатов состоит в том, что в работе:

Автором был обоснован состав сплава Al-2%Mn-2%Cu (масс. %) применительно к промышленным условиям литья среднеразмерных слитков. Показано, что наличие в структуре модельного сплава дисперсоидов $Al_{20}Cu_2Mn_3$ в количестве около 7 об. % и размером менее 100 нм позволяет сохранить в отожженном состоянии (400 °С, 3 ч) нерекристаллизованную структуру, несмотря на значительную степень деформации при холодной прокатке (95 %). Показано, что при скорости охлаждения в процессе кристаллизации, характерной для метода литья в ЭМК, концентрация Mn в алюминиевом твердом растворе может быть повышена до 3 масс. %, что позволяет получить в конечной структуре проволоки наноразмерные дисперсоиды фазы $Al_{20}Cu_2Mn_3$ в количестве более 10 об. %. Был обоснован состав сплава Al-3Mn-4Cu (масс. %) и режимы ДТО применительно к получению длинномерных заготовок диаметром 8-10 мм методом литья в ЭМК, позволяющие реализовать высокий комплекс прочности, удельной электропроводности (УЭП) и термостойкости (до 400 °С). Показано, что обработка кручением под высоким давлением (КВД) сплавов Al-Cu-Mn-(Zr), полученных методом литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК), приводит к значительному повышению прочностных характеристик (до 700 МПа) за счет формирования зеренно-субзеренной наноструктуры с высокой плотностью дислокаций. Установлено, что прочность и термическая стабильность деформированных полуфабрикатов существенно зависят от режима предварительной термообработки: оптимальные механические свойства достигаются при низкотемпературном отжиге (до 350 °С) или его отсутствии, тогда как промежуточный отжиг при 450 °С снижает эффективность последующей КВД.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы Черкасова Станислава Олеговича заключается в том, что автором были обоснованы режимы ДТО сплавов Al-Cu-Mn-(Zr), предназначенных для традиционной технологии литья, позволяющие изготавливать деформированные полуфабрикаты прессованием, прокаткой и волочением. Предложен состав и способ получения термостойкой высокопрочной проволоки из алюминиевого сплава, содержащего 3 марганца и 4 масс. % меди, получаемого методом ЭМК и демонстрирующего следующий комплекс физико-механических свойств после 3-х часового нагрева при 375°C: σ_B - 350 МПа, УЭП- 48 IACS. Предложен способ получения деформированных полуфабрикатов из сплава Al-3Mn-4Cu (масс. %) , полученного методом ЭМК и включающий обработку КВД, позволяющий достигнуть следующего комплекса механических свойств после нагрева при 250°C: σ_B - 550 МПа, $\sigma_{0,2}$ - 450 МПа, δ - 10%.

Также в соавторстве был разработан и запатентован способ получения термостойкой высокопрочной алюминиевой проволоки позволяющий получить следующий комплекс свойств после 3-х часового нагрева при 400°C: временное сопротивление превышает 360 МПа, предел текучести - 330 МПа, относительное удлинение - 5%, удельная электропроводность - более 44% IACS. Кроме того, был предложен и запатентован способ получения деформированных полуфабрикатов из алюминиевого сплава, позволяющий получить термостойкий деформированный полуфабрикат с высокими механическими свойствами в отожженном состоянии: временное сопротивление при растяжении не менее 550 МПа, предел текучести не менее 450 МПа, относительное удлинение при растяжении - не менее 10%.

Достоверность результатов исследований

Полученные результаты исследования обладают высокой степенью достоверности, обеспеченной тщательным проведение экспериментов с применением современных методов с использованием современного оборудования и комплексным анализом полученных результатов. По результатам работы были сделаны доклады на 7 конференциях (4 из которых имели статус международных), с участием ведущих специалистов в области исследования, кроме того по теме работы сделано 11 публикаций, в том числе в изданиях имеющий рейтинг Q1, что подтверждает значимость и достоверность полученных результатов.

Рекомендации по использованию результатов исследования

Результаты диссертационной работы Черкасова С.О. имеют потенциал применения в производстве проводниковой продукции для изготовления термостойких токонесущих элементов, в частности, в производстве проволоки для высоковольтных линий. Перспективным для промышленного применения является полученный массив данных по величине удельного электрического сопротивления, особенно в совокупности с предложенными расчетными моделями зависимости УЭС от температуры нагрева. Данные, полученные в ходе исследования представляют практический интерес как для промышленного внедрения термостойких проводниковых сплавов системы Al-Cu-Mn-Zr,

так и для разработки новых термостойких материалов, в том числе с использованием технологии литья в ЭМК.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на высокий научный уровень диссертации, можно отметить следующие замечания к настоящей работе:

1. В первом пункте практической значимости работы (с. 9) указаны разрабатываемые сплавы в виде системы Al-Cu-Mn-(Zr), а физико-механические свойства проволоки, изготовленной из этих сплавов прессованием, волочением, после 3-х часового нагрева при 350 °С приведены конкретные значения без указания интервала их изменений.
2. В подразделе 3.2.2, в котором описывается литая структура экспериментального сплава Al-2 % Mn-2 % Cu (слиток диаметром 60 мм) наряду с фазой Al₂Cu, указано наличие фазы Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ (рисунок 3.6, с.63 и рисунок 7). Причем средний размер частиц данной фазы составляет 15-16 мкм (из рисунков). С учетом того, что сплав готовился на основе алюминия А99 высокой чистоты, в котором по ГОСТ11069-2001 наличие Si и Fe не должно превышать 0,003 % (вес.). Образование частиц такого размера при данном содержании Si и Fe вряд ли возможно. Поэтому объяснение о формировании частиц фазы Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ в структуре сплава желательно было бы привести в тексте диссертационной работы.
3. В подразделе 3.4.3(с. 77) приведена разработка модели зависимости УЭП (удельной электропроводности) от температуры отжига образцов из сплава системы Al-Mn-Cu-Zr. В расчетной формуле присутствует эмпирическая константа K₀, значение которой составляет 0,84. Однако, нет пояснения в тексте как она рассчитана, указано только, что константа получена по результатам обработки расчетных и экспериментальных данных.
4. Следует отметить, что одновременное использование характеристик электропроводности и удельного электрического сопротивления образцов затрудняет понимание логики автора в его рассуждениях (Глава 4, с. 88-89), а также применение обозначений механических характеристик сплавов на английском языке (Глава 4, рисунок 4.8, таблица 4.4), хотя в тексте диссертации есть список условных обозначений.
5. В тексте диссертации и автореферата имеются недочеты, погрешности, стилистические неточности. Например, на рисунках 6 и 8 автореферата неточно указаны составы фаз Al₂₀Cu₂Mn₃, Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ (по сравнению с текстом); с. 66 - «Анализ структуры образцов представлен на рис. 3.9...»; название рис. 4.1 «Микроструктура сплава, отлитого в литом состоянии...» (с. 81); не показаны индексы с. 68, 84 и др. Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей научной ценности и практической значимости диссертационной работы.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация логично построена, структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Результаты работы опубликованы в 11 научных работах, в том числе в международных журналах, входящих в 1 квартиль, и прошли апробацию на международных конференциях и российских конференциях.

В целом диссертация Черкасова Станислава Олеговича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований и их интерпретации получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важной научной и практической задачи.

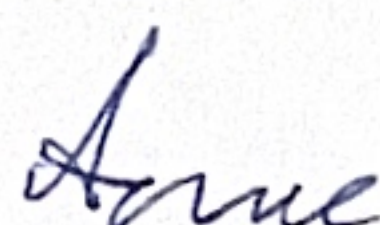
Поставленные в работе цели и задачи полностью достигнуты, а основные результаты отражены в достоверно обоснованных выводах. Работа изложена понятным научным языком, имеет четко прослеживаемую логику. Все результаты работы получены либо автором лично, либо при его непосредственном участии.

Заключение


По актуальности и объему выполненных исследований, научной новизне и практической значимости полученных результатов диссертационная работа Черкасова С.О. «Обоснование состава и режима деформационно-термической обработки наноструктурных проводниковых сплавов системы Al-Cu-Mn-(Zr), полученных методом литья в электромагнитный кристаллизатор» соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным в «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», а ее автор Черкасов Станислав Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Настоящий отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры ОМДиМ ФГБОУ ВО «СибГИУ» «4» марта 2025 года. Протокол заседания № 8 - 24

Заведующий кафедрой обработки металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, доктор технических наук (специальность 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»), доцент

 Арышенский Евгений Владимирович

Профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, доктор технических наук (специальность 05.16.09 «Материаловедение (в машиностроении)»), доцент

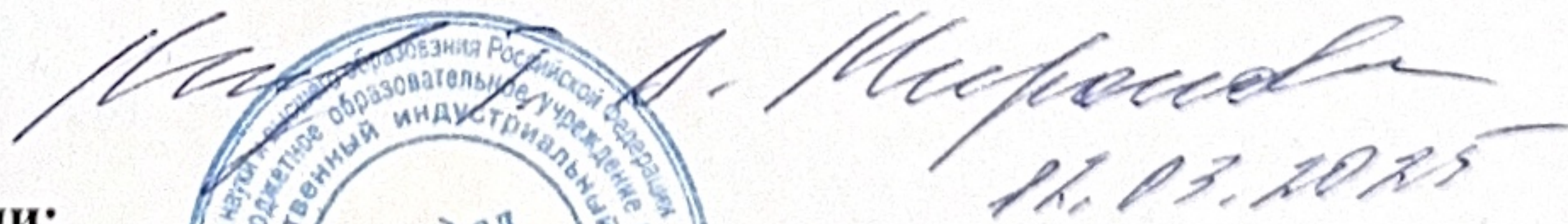
 Прудников Александр Николаевич

*Верно:
Начальник отдела
кадров СибГИУ*

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет». Адрес: 654007, Кемеровская область - Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42. Тел.: +7 (3843) 77-79-79. E-mail: rector@sibsiu.ru



 21.03.2025