



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, тел.: +7 (343) 375-45-07
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

22.04.2025 № 01.09-07/416
На № _____ от _____



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по науке
А.В.Германенко
_____ 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Акопяна Торгома Кароевича

«Научные основы разработки высокопрочных и высокотехнологичных
многокомпонентных алюминиевых сплавов, содержащих медь и кальций»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по
специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Актуальность темы диссертационного исследования

Актуальность представленной работы обусловлена все возрастающими требованиями промышленности к комплексу эксплуатационных свойств современных алюминиевых сплавов. Замена тяжелых металлических материалов более легкими алюминиевыми сплавами позволило бы обеспечить снижение энергопотребления при сопоставимом или более высоком уровне эксплуатационных свойств изделий. Однако большинство применяемых в настоящий момент марочных алюминиевых сплавов представляют собой разработки 70-, 80-х годов прошлого столетия, и могут существенно отставать от требований, предъявляемых к материалам для современных образцов техники. Повышение уровня эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов способствовало бы их более широкому внедрению в различных отраслях промышленности. Решение данной проблемы может быть достигнута как путем модифицирования химического состава и режимов обработки сплавов на основе существующих систем легирования, но с учетом современных достижений и представлений в области формирования структуры и свойств материалов, так и путем перехода к принципиально новым системам легирования. В качестве решения первой части данной научной проблемы в диссертации обоснован подход и предложены разработки новых материалов на основе широко используемых в промышленности медьсодержащих термически упрочняемых литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, обладающих повышенной прочностью после старения за счет модифицирования структуры продуктов старения при микролегировании легкоплавкими металлами. В качестве альтернативы в работе изучена и обоснована возможность перехода к принципиально новым системам легирования с эвтектикообразующей добавкой кальция взамен разрабатываемым перспективным и промышленным алюминиевым сплавам, в которых в качестве таковой добавки применяется дорогостоящий никель или редкоземельные металлы.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения; изложена на 381 странице машинописного текста, включая приложения, и содержит 181 рисунок, 67 таблицы и список литературы из 412 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулирована цель работы и основные задачи. Приведены научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, подтверждение достоверности и апробации приведенных результатов.

В первой главе представлены результаты детального обзора литературных данных, в области процессов старения и их влияния на свойства Al-Cu сплавов, включающих также малые добавки легкоплавких металлов Cd, Sn, In и т.д. Отмечается высокая эффективность Sn, In и Cd для усиления эффекта дисперсионного твердения в Al-Cu сплавах. Показано, что отсутствуют конкретные примеры применения данного явления в промышленно пригодных сплавах. Кроме того, несмотря на многочисленные исследования конкретный механизм(ы) влияния перечисленных малых добавок на эффект упрочнения в Al-Cu сплавах все еще остается дискуссионным.

Показана высокая активность исследователей в области конструирования материалов на базе эвтектических систем Al-X (где X – это Ce, La, Ni, Fe, Y, Pr, Nd и т.д.). Отмечается, что основным недостатком данных материалов является невысокие прочностные свойств при комнатной температуре. Установлено, что в качестве альтернативы могут быть рассмотрены эвтектические системы, содержащие кальций. Система Al-Sa перспективна для разработки легких, термически неупрочняемых литейных и деформируемых алюминиевых сплавов нового поколения с высокой толерантностью к содержанию примесей железа и кремния. Разработки в области термически упрочняемых медь- и кальцийсодержащих сплавов отсутствуют.

Во второй главе представлено описание характеристик основных и вспомогательных материалов, использованных для приготовления исследуемых сплавов. Дана общая характеристика процесса плавки и литья для всех сплавов, включая описание использованного оборудования, а также представлена последовательность технологических операций в процессе плавки и литья сплавов как в лабораторных условиях, так и с применением промышленного оборудования. Кроме того, приведены характеристики основного аналитического оборудования и методов исследований структуры, фазового состава и физико-механических свойств, использованные в работе.

В третьей главе изучено влияние микродобавок легкоплавких металлов Sn и In на структуру и свойства литейных Al-Si-Cu сплавов при различном содержании основных легирующих добавок (сплавы типа АК8М, АЗ19 или АК8МЗ). По результатам проведенных расчетно-экспериментальных исследований отмечается, что нецелесообразно превышение концентрации Sn и In в Al-Si-Cu сплавах свыше 0,1 масс.%. Анализ влияния малых добавок на процесс старения сплавов на основе Al-Si-Cu выявил существенное повышение эффекта дисперсионного твердения, которое достигается за более короткое время старения. Анализ микромеханизмов данного явления с использованием прецизионных аналитических методов исследований, включающих просвечивающую электронную микроскопию и атомно-зондовую томографию, выявил, что малые добавки олова или индия существенно измельчают структуру продуктов старения, представленную нановыделениями частиц θ' -фазы. Помимо частиц θ' -фазы в тонкой структуре сплавов с легкоплавкими добавками также наблюдается присутствие наноразмерных сферических частиц, которые насыщены Sn или In и обнаруживаются в контакте с некоторыми частицами θ' -фазы. Проведен анализ эволюции структуры продуктов старения на различных этапах ее развития, проведена оценка химического состава, плотности распределения и средний линейных размеров наблюдаемых частиц. На основании выполненной работы был предложен новый высокопрочный литейный алюминиевый сплав на базе Al-Si-Cu, содержащий малую добавку олова (пат. РФ 2754418), который позволяет после ускоренной термообработки

получить высокие механические свойства: сопротивление на разрыв (σ_b) не менее 400 МПа, предел текучести ($\sigma_{0,2}$) не менее 325 МПа, относительное удлинение (δ) - не менее 3 %.

В четвертой главе изучено влияние малых добавок In и Sn на фазовый состав и физико-механические свойства сплавов Al-Cu в литом состоянии и после деформационной обработки. Показано, что микролегирование легкоплавкими добавками обеспечивает значительное упрочнение (от 10 до 60 % в зависимости от конкретного содержания меди) в сравнении с базовыми сплавами без добавки. Анализ минимальной концентрации добавки олова в составе деформированных Al-Cu сплавов выявил, что при содержании данного элемента менее 0,025 масс.% в сплаве на основе Al-5 масс.% Cu не наблюдается повышенного эффекта дисперсионного твердения при старении. Анализ эволюции продуктов старения с использованием прецизионных методов исследований на примере олово содержащего сплава выявил два типа выделений: насыщенные медью (частицы θ' -фазы) и Sn. Количественный анализ показал, что плотность распределения выделений θ' -фазы в три раза выше, чем у частиц Sn, кроме того, представлены данные, согласно которым атомы Sn растворяются в θ' -фазе, демонстрируя растворимость 0,05-0,2 ат.% при среднем значении 0,1 ат.% (~0,3 масс.%) для большинства выделений. Расчетно-экспериментальными методами исследовано влияние 0,1 % добавки Sn на микроструктуру, фазовый состав, эффект упрочнения при старении и механические свойства сплава на базе системы Al-Cu-Mn, являющейся основой для промышленных сплавов типа 2219 (1201). По результатам проведенных работ был предложен новый высокопрочный деформируемый сплав на основе системы Al-Cu-Mn, содержащий малую добавку олова (№ регистрации заявки на патент 2024112439), который позволяет после термообработки получить высокие механические свойства: σ_b не менее 480 МПа, $\sigma_{0,2}$ не менее 410 МПа, δ не менее 9,5 %.

В пятой главе представлены результаты работ по изучению структуры, фазового состава и физико-механических свойств новой группы термически не упрочняемых кальцийсодержащих алюминиевых сплавов эвтектического типа. В частности, представлены результаты работ по получению деформируемых полуфабрикатов из слитка сплава $Al_4Ca_1Fe_{0,6}Si_{0,2}Zr_{0,1}Sc$ диаметром 150 мм, отлитого на промышленном комплексе непрерывного литья алюминиевых сплавов. Отмечается, что несмотря на высокую долю интерметаллидных частиц эвтектического происхождения (более 15 масс.%), сплав обладает высокой технологичностью в процессе горячей деформации при температурах 400-450 °C и степенях деформации свыше 90 %. По результатам проведенных исследований разработан способ получения слитков из алюмо-матричного композиционного сплава (патент RU 2697683 C1 от 16.08.2019), а также способ получения деформированных полуфабрикатов из алюминиево-кальциевого композиционного сплава (патента: RU 2716566 C1 от 12.03.2020).

Для ранее неопisanного тройного интерметаллидного соединения $Al_{10}CaFe_2$, обнаруженного в равновесии в новой системе легирования Al-Ca-Fe, произведена расшифровка кристаллической структуры, получены данные о положении атомов и симметрии элементарной ячейки.

На основе экспериментального и расчетного анализа предложена структура ранее неизученной тройной системы Al-Ca-La вблизи алюминиевого угла. Установлена значительная взаимная растворимость соединений $Al_4(Ca,La)$ и $Al_{11}(La,Ca)_3$ в области алюминиевого угла. Отмечается высокая технологичность алюмо-матричных композиционных материалов на базе Al-Ca-La-Mn как при получении отливок (показатель горячеломкости по карандашной пробе 4-6 мм), так и при деформационной обработке. Для экспериментального сплава Al-3 масс.%Ca-2масс.%La-1,5 масс.% Mn выявлены наиболее благоприятные режимы получения листового проката, обеспечивающие достижение предела прочности деформированных полуфабрикатов 240-290 МПа, предела текучести 200-250 МПа, при высоком относительном удлинении 5,5-15,5 %.

С использованием расчетно-экспериментальных методов проведен анализ другой ранее неизученной системы Al-Ca-Ni-La в области алюминиевого угла. Показано, что

соединения $Al_4(Ca,La)$ и $Al_{11}(La,Ca)_3$, а также тройное соединение Al_9CaNi находятся в равновесии с алюминиевым твердым раствором (Al) в перспективных доэвтектических сплавах Al-Ca.

Показана высокая перспективность системы Al-Ca-Mg для конструирования на ее основе новых термически неупрочняемых алюмо-матричных композиционных материалов взамен промышленным сплавам 5000 серии. На примере деформированных сплавов Al-3%Ca-(2-4)%Mg-Mn, полученных в виде листового проката, установлен характерный уровень механических свойств, составляющий 230-250 МПа для предела текучести и 300-340 МПа для предела прочности при умеренной пластичности ~3-5 %. Детальный анализ различных механизмов, влияющих на упрочнение, произведенный на примере сплава Al_3Ca_2Mg , показал, что вклад границ субзерен (более 60 % от уровня предела текучести) является наибольшим и значительно превосходит все остальные. Таким образом, добавление кальция в деформируемые сплавы Al-Mg позволяет повысить прочностные свойства за счет стабилизации субзеренной структуры, а не за счет упрочнения непосредственно интерметаллидными частицами фазы Al_4Ca . Сплавы данной группы были использованы для опробования в промышленных условиях предприятия «Авиаль» для получения присадочной сварочной проволоки диаметром 2,0 мм, предназначенной для сварки плавлением.

Высокотемпературные испытания на сжатие при повышенной температуре 350 °С, проведенные для обоснованных в данном разделе работы составов новых термически неупрочняемых кальцийсодержащих алюмоматричных композиционных материалов на базе систем Al-Ca-La-Ni-Mn, полученных в виде отливок, и содержащих в структуре от 15 до 30 об.% интерметаллидных эвтектических фаз, в сравнении с термически упрочняемыми литейными силуминами на базе $Al_8Si_3,5Cu$ с малыми добавками Sn и In, выявили существенные преимущества последних по уровню прочности.

В шестой главе представлены результаты анализа ранее неизученных медь и кальцийсодержащих систем на базе Al-Cu-Ca. Анализ новой тройной системы Al-Ca-Cu показал, что алюминиевый твердый раствор (Al) может находиться в равновесии с четырьмя интерметаллидными соединениями: $(Al,Cu)_4Ca$, $Al_{27}Ca_3Cu_7$, Al_8CaCu_4 и Al_2Cu , из которых первые три описаны впервые. Результаты анализа с использованием методов электронной микроскопии и рентгенофазового анализа выявили, что фаза $(Al,Cu)_4Ca$ представляет собой твердый раствор на основе соединения Al_4Ca , где алюминий частично замещается атомами меди. При этом растворимость меди в соединении достигает 10 ат.% (19 масс.%), что приводит к заметным изменениям его структуры и физико-механических свойств. Фаза $Al_{27}Ca_3Cu_7$ представляет собой стехиометрическое тройное соединение с примитивной кристаллической структурой типа $BaHg_{11}$ и пространственной группой $Pm\bar{3}m$ (символ Пирсона $tI10/1$). Фаза Al_8CaCu_4 также представляет собой стехиометрическое тройное соединение с тетрагональной структурой кристаллической решетки типа $Mn_{12}Th$ (символ Пирсона $tI26/1$). Для новых обнаруженных соединений установлена микротвердость, плотность, а также КТР в широком интервале температур. По результатам проведенных работ предложена проекция поверхности ликвидус системы Al-Ca-Cu в области алюминиевого угла, включающая три нонвариантных тройных эвтектических превращения.

Для конструирования сплавов, склонных к дисперсионному твердению при старении, была дополнительно изучена четверная система Al-Cu-Ca-Si. В области алюминиевого угла данной системы выявлено наличие в равновесии ранее неопisanного четверного соединения, идентифицированного как стехиометрическое соединение $Al_2CaSiCu$ с тетрагональной структурой $I4/mmm$. Показано, что в области диаграммы состояния, перспективной для создания новых дисперсионно-твердеющих сплавов, новая фаза $Al_2CaSiCu$ находится в равновесии в двух квазитройных сечениях $(Al)+Al_2Cu+Al_2CaSiCu$ и $(Al)+Al_2Si_2Ca+Al_2CaSiCu$ и одной четырехфазной области $(Al)+Al_2Cu+Al_2Si_2Ca+Al_2CaSiCu$. Отмечается, что для достижения высокого эффекта дисперсионного твердения в сплавах данной группы соотношение кремния к кальцию

должно быть не менее 1,1-1,2. Для перспективных сплавов данной группы проведены исследования склонности к горячеломкости при литье, а также возможность получения путем горячей прокатки листового проката, примененного для последующего термического упрочнения. На основе проведенных работ был предложен новый высокопрочный деформируемый сплав на основе системы Al–Cu–Ca, (№ регистрации заявки на патент 2024112437), который позволяет после термообработки получить высокие механические свойства: σ_b на разрыв не менее 430 МПа, $\sigma_{0,2}$ не менее 290 МПа, относительное удлинение (δ) - не менее 10,0 %.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы по полученным результатам исследований.

Достоверность и обоснованность представленных результатов обеспечивается применением передовых аналитических экспериментальных и расчетных методов анализа структуры, фазового состава и физико-механических свойств. Экспериментальные данные получены в результате проведения достаточного количества структурных исследований и механических испытаний, с необходимым для получения достоверных данных количеством измерений.

Представленные результаты в значительной части обнародованы в ведущих отечественных и зарубежных научных изданиях, а также представлены и обсуждены на российских и международных конференциях.

Научная новизна работы:

1. Изучено влияние малой добавки олова и индия на фазовый состав, структуру и упрочнение литейных и деформируемых сплавов с Al–Cu матрицей и уточнены микромеханизмы данного явления.

2. Показано, что малая добавка олова или индия (в количестве не более ~0,1 масс.%) ингибирует процессы естественного старения закаленных сплавов и напротив катализируют процессы распада алюминиевого твердого раствора во время искусственного старения, делая его более интенсивным и полным как для литых, так и для деформируемых образцов. Пиковая твердость достигается за более короткое время старения и может превосходить пиковую твердость сплавов без малых добавок на десятки процентов (в зависимости от конкретной концентрации меди в растворе).

3. Показано, что повышенный эффект дисперсионного твердения в сплавах с малыми добавками обусловлен глубоким модифицированием структуры продуктов старения, представленных частицами метастабильной θ' -фазы и сопутствующих им наночастиц, насыщенных Sn или In.

4. Выявлена высокая растворимость кремния в θ' -фазе, составляющая 2,2-2,8 ат.% Si. Кроме того, установлена заметная растворимость Sn в частицах θ' -фазы. Концентрация Sn в частицах θ' -фазы колеблется от $0,05 \pm 0,02$ до $0,20 \pm 0,02$ ат.%, при этом для большинства выделений средняя концентрация олова составляет 0,05-0,10 ат.%.

5. На примере модельных деформируемых сплавов на основе композиции Al-5 масс.% Cu показано, что для достижения эффекта повышенного упрочнения при старении концентрация олова должна быть не менее 0,025 масс.% ($5,4 \cdot 10^{-3}$ ат.%), что обусловлено растворимостью атомов Sn в θ' -фазе в количестве 0,05-0,2 ат.% при среднем значении 0,1 ат.% (~0,3 масс.%) для большинства выделений.

6. Обоснована возможность конструирования новой группы высокотехнологичных алюминиевых сплавов, содержащих в качестве основной легирующей добавки кальций и другие эвтектикообразующий элементы Ni, La и Fe. Для достижения более высокой прочности после термической обработки эвтектика, образованная кальцием, была совмещена с Al–Cu матрицей, склонной к высокому дисперсионному твердению.

7. Предложено строение ранее неизученной тройной системы Al–Ca–La в области алюминиевого угла. Показано, что соединения $Al_4(Ca,La)$ и $Al_{11}(La,Ca)_3$, представляющие собой твердые растворы на базе соединений Al_4Ca и $Al_{11}La_3$, и обладающие широкой областью гомогенности, могут находиться в равновесии с алюминиевым твердым

раствором (Al), и включены в одно нонвариантное эвтектическое превращение $L \rightarrow Al + Al_4(Ca,La) + Al_{11}(La,Ca)_3$ в рассматриваемой части системы.

8. Предложено строение ранее неизученной четверной системы Al-(2-4)масс.%Ca-Ni-La в области алюминиевого угла. Показано, что соединения $Al_4(Ca,La)$ и $Al_{11}(La,Ca)_3$, а также тройное соединение Al_9CaNi находятся в равновесии с алюминиевым твердым раствором (Al) в перспективных доэвтектических сплавах Al-Ca. Выявленные фазовые равновесия предполагают наличие в рассматриваемой части диаграммы двух нонвариантных превращений: перитектического $L + Al_3Ni \rightarrow Al_9CaNi + Al_{11}(La,Ca)_3$ и эвтектического $L \rightarrow Al_4(Ca,La) + Al_9CaNi + Al_{11}(La,Ca)_3$.

9. Определена кристаллическая структура ранее не описанного интерметаллидного соединения $Al_{10}CaFe_2$. Получены данные о положении атомов и симметрии элементарной ячейки, соответствующие орторомбической пространственной группе (Cmcm) и структурному типу $YbFe_2Al_{10}$, а также определены параметры решетки $a = 9,024 \text{ \AA}$, $b = 10,200 \text{ \AA}$, $c = 9,062 \text{ \AA}$.

10. Предложено строение ранее неизученной тройной системы Al-Ca-Cu в области алюминиевого угла. Показано, что алюминиевый твердый раствор (Al) может находиться в равновесии с четырьмя интерметаллидными фазами: $(Al,Cu)_4Ca$, $Al_{27}Ca_3Cu_7$, Al_8CaCu_4 и Al_2Cu , из которых первые три описаны впервые. Определены параметры кристаллических решеток, химический состав, плотность, микротвердость и КТР соответствующих соединений $(Al,Cu)_4Ca$, $Al_{27}Ca_3Cu_7$ и Al_8CaCu_4 .

11. Предложено строение ранее неизученной четверной системы Al-Ca-Cu-Si в области алюминиевого угла. Показано наличие в равновесии ранее не описанного четверного соединения, идентифицированного как стехиометрическое соединение $Al_2CaSiCu$ с тетрагональной структурой. Определены параметры кристаллической решетки, плотность и микротвердость данного соединения.

12. Для новых сплавов на базе системы Al-5%Cu-(0,8-1,4)%Ca-(1,4-1,6)%Si, полученных в виде отливок и деформированных полуфабрикатов, установлена высокая склонность к дисперсионному твердению, не уступающая классическим сплавам на базе систем Al-Cu и Al-Si-Cu. При этом показано, что для достижения заметного упрочнения при старении содержание кремния должно быть как минимум в 1,1-1,4 раза выше, чем кальция.

Практическая значимость:

1. Предложен литейный сплав на основе системы Al-Cu-Si, содержащий малую добавку олова (пат. РФ 2754418), который позволяет после ускоренной термообработки получить высокие механические свойства: сопротивление на разрыв (σ_B) не менее 400 МПа, предел текучести ($\sigma_{0,2}$) не менее 325 МПа, относительное удлинение (δ) - не менее 3 %.

2. Предложен высокопрочный деформируемый сплав на основе системы Al-Cu-Mn, содержащий малую добавку олова (№ регистрации заявки на патент 2024112439), который позволяет после термообработки получить высокие механические свойства: σ_B не менее 480 МПа, $\sigma_{0,2}$ не менее 410 МПа, δ не менее 9,5 %.

3. Разработан способ получения слитков из алюмо-матричного композиционного сплава (патент RU 2697683 C1 от 16.08.2019), а также способ получения деформированных полуфабрикатов из алюминиево-кальциевого композиционного сплава (патента: RU 2716566 C1 от 12.03.2020). Разработана технологическая инструкция №ТИ 11.2072.2017-T1 на плавку и литье алюминиево-кальциевых сплавов, упрочняемых наночастицами фазы L_{12} , включая рекомендации по применению шихтовых материалов, а также регламент № 11.2072.2017-P1 на изготовление экспериментальных партий образцов в виде слитков из перспективных алюминиево-кальциевых сплавов на промышленном оборудовании.

4. Показана высокая перспективность системы Al-Ca-Mg для конструирования на ее основе новых алюмо-матричных композиционных материалов, которые могут стать альтернативой промышленным деформируемым сплавам 5000 серии, существенно превосходя последних по уровню прочностных свойств при высокой технологичности в

процессе деформационной обработки. Сплавы на основе системы легирования Al–Ca–Mg–Mn–Zr (без и с дополнительным легированием 0,2 масс. % Sc) в состоянии после отжига на воздухе при температуре 400 °С в течение 3 ч в условиях ООО «Авиаль» в виде слитков были использованы для получения присадочной сварочной проволоки диаметром 2,0 мм, предназначенной для сварки плавлением.

5. Предложен высокопрочный деформируемый сплав на основе системы Al–Cu–Ca, (№ регистрации заявки на патент 2024112437), который позволяет после термообработки получить высокие механические свойства: σ_b не на разрыв (σ_b) не менее 430 МПа, предел текучести ($\sigma_{0,2}$) не менее 290 МПа, относительное удлинение (δ) - не менее 10,0 %. Сплав может быть использован при производстве высокопрочных деформированных полуфабрикатов в виде катаных плит и листов, поковок и прессованных прутков. Кроме того, для термически неупрочняемого экспериментального сплава на базе Al–Cu–Ca–Mn–Zr была изготовлена опытная партия металлопорошковой композиции методом газовой атомизации (с выделением фракции 20-63 мкм), предназначенная для получения тестовых образцов методом селективного лазерного плавления для проведения механических и структурных исследований.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы Т.К. Акопяна могут быть использованы на предприятиях: автомобильной промышленности (АвтоВАЗ, КАМАЗ, Группа ГАЗ, Соллерс, ЗИЛ и т.д.); специализирующихся на выпуске продукции из алюминиевых сплавов (ОК РУСАЛ, АО «ЗАС», Самарский Металлургический завод и т.д.), а также для использования и внедрения в исследовательских институтах РАН, отраслевых научно-исследовательских институтах, научно-производственных объединениях, федеральных государственных унитарных предприятиях и в вузах (ИФТТ РАН, ОАО «Композит», ФГУП ВИАМ, МГТУ им. Н.Э. Баумана и т.д.).

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати. Всего автором в авторстве и соавторстве опубликовано не менее 100 статей в изданиях из перечня ВАК РФ, в их числе 100/74/90 статей в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus/Web of Science/РИНЦ. Также, получено 6 патентов и поданы 2 заявки на регистрацию новых разработок.

Замечания к диссертационной работе:

1. В главах 3 и 4, при изучении кинетики распада Al-твёрдого раствора в сплавах Al-Si-Cu-Sn и Al-Cu-Mn-Sn установлено, что микродобавка олова меняет морфологию и ускоряет выделение частиц Θ' - фазы, но не влияет на частицы других упрочняющих фаз (например, фазы Т). Необходимо объяснить, с чем связано такое избирательное действие олова на продукты старения. Утверждение автора о торможении выделения частиц при естественном старении в сплавах, содержащих олово или индий, требует более глубокого обоснования.
2. Одной из задач диссертации является создание экономно-легированных Al сплавов на основе новых базовых систем (Al-Ca-Fe, Al-Ca-La, Al-Cu-Ni-La), однако, практически во все композиции предлагается вводить дорогостоящие микродобавки Sc и Zr (глава 5). На сколько такое микролегирование целесообразно, и как оно изменяет свойства сплавов относительно соответствующих аналогов.
3. Известно, что одним из преимуществ Al-Mg сплавов является их высокая коррозионная стойкость. Для замены традиционных Al-Mg сплавов автор предлагает новый сплав Al-Ca-Mg в виде слитков и деформированных полуфабрикатов. Так как оценку коррозионных свойств новых сплавов не проводили, то непонятно, могут ли они конкурировать, несмотря на высокие механические свойства, с известными промышленными сплавами 5xxx серии.

4. В 6 главе подробно описаны принципы конструирования новых литейных и деформируемых термически упрочняемых сплавов четверной системы Al-Cu-Ca-Si, показана их высокая технологичность при деформационной обработке (листовой прокат, прессованные прутки, катаные плиты и т.д.), получены высокие механические свойства и проведено их сравнение со свойствами известных промышленных композиций 2219 и 2618, работающих в экстремальных условиях эксплуатации – при отрицательных температурах и в условиях высоких нагрузок и температур соответственно. В связи с этим, было бы целесообразно провести испытание предлагаемых новых сплавов в более широком интервале внешних нагрузок.

Указанные замечания не являются определяющими при оценке работы, которая оставляет хорошее впечатление, содержит научную новизну и практическую значимость и направлена на решение важной народно-хозяйственной задачи – создания высокотехнологичных алюминиевых сплавов с высокими свойствами.

Заключение

Диссертационная работа Т.К. Акопяна «Научные основы разработки высокопрочных и высокотехнологичных многокомпонентных алюминиевых сплавов, содержащих медь и кальций» является самостоятельным, логически завершенным исследованием. Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», а ее автор, Акопян Торгом Кароевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Отзыв составлен на основании положительного заключения семинара кафедры термообработки и физики металлов Уральского федерального университета им. Первого Президента России Б.Н.Ельцина. Протокол №4 от 17 апреля 2025 г.

Заведующий кафедрой термообработки
и физики металлов профессор, д.т.н.

А.А.Попов

Ученый секретарь, доцент, к.т.н.

О.А.Козмец